

MARINA MOURA DE SOUZA

PROPRIEDADES DE BRIQUETES E PELLETS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S729p
2014 Souza, Marina Moura de, 1983-
Propriedades de briquetes e pellets produzidos com resíduos
sólidos urbanos / Marina Moura de Souza. – Viçosa, MG, 2014.
ix, 71f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Biocombustível. 2. Briquete (Combustível). 3. Pellet.
4. Energia - Fontes alternativas. 5. Resíduos sólidos urbanos.
6. Reaproveitamento (Sobras, etc). I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 662.88

MARINA MOURA DE SOUZA

PROPRIEDADES DE BRIQUETES E PELLETS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 04 de junho de 2014.

Márcio Arêdes Martins

Waldir Ferreira Quirino

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho

Benedito Rocha Vital
(Coorientador)

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

A Deus, Pai misericordioso, que me ilumina e me guia mesmo quando estou distante.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE) pelo apoio e financiamento deste projeto de Pesquisa e Desenvolvimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudos.

Aos funcionários e dirigentes da Universidade Federal de Viçosa (UFV), que fazem desta Universidade uma das melhores do país.

Ao Governo Federal do Brasil que, juntamente com o CNPq investiu em jovens pesquisadores com o Programa Ciências Sem Fronteiras e que me proporcionou a oportunidade de estudar em uma Universidade Norte Americana.

Meus sinceros agradecimentos à minha orientadora, Dra. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Cassinha, por ter me recebido de volta à Viçosa, por ter acreditado e confiado em mim para o desenvolvimento desta pesquisa e principalmente por demonstrar o exercício de sua profissão com dedicação e amor.

Ao Professor Dr. Benedito Rocha Vital, que sempre esteve disponível para auxiliar e por não ter desistido diante da difícil tarefa de colocar a peletizadora em funcionamento.

À Professora Dra. Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, por estar presente e disponível sempre que preciso.

Aos funcionários do LAPEM, demais laboratórios e DEF, que nos dão suporte durante toda nossa pesquisa, principalmente ao Sr. Maninho, ao Moiado, Ritinha e Alexandre, que nos ajudam sem medir esforços.

Ao gerente deste projeto na EMAE, Admilson Barbosa, que ao longo do tempo se tornou um grande amigo.

Aos estagiários: Tatiane, Vanessa, Thaynan, Rafael, Gabriela, Mathias e Vinícius pela dedicação e amizade.

Aos professores integrantes da equipe deste projeto: Cláudio Mudado, Ana Augusta Passos Resende, Amaury Paulo de Souza, Luciano José Minetti, Cleverson de Melo Sant'Ana e Delly Oliveira Filho.

Aos professores que me recepcionaram em North Carolina State University: Dr. Richard Venditti, Dr. Jammel, Dra. Dhana, Dr. Daniel Saloni e aos amigos que estiveram comigo durante esta etapa.

Às minhas amigas de república: Fernanda, Nara, Lora e Melissa, por praticarem a difícil arte do convívio e aos meus amigos do LAPEM em especial Babi e Tito pelo carinho de sempre.

Ao meu pai, meu exemplo. Aos meus irmãos, tios e avósque sempre me incentivaram nesta jornada acadêmica.

Finalmente ao Betão, por ter partilhado a saudade e por me trazer a certeza de que tudo valeu e continua valendo a pena.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO I	5
MUNICIPAL SOLID WASTE ASSESSMENT AIMING THE USE AS AN ENERGY SOURCE	5
1. INTRODUCTION	6
2. MATERIAL AND METHODS	9
2.1. Materials	9
2.2. Methods	10
3. RESULTS	13
4. CONCLUSIONS	24
5. REFERENCES	25
CAPÍTULO II	28
PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BRIQUETES COMPOSTOS POR DIFERENTES PROPORÇÕES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	28
1. INTRODUÇÃO	29
2. MATERIAL E MÉTODOS	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
3.1. Características dos Resíduos sólidos urbanos	35
3.2. Briquetes compostos por resíduos de poda urbana e lodo de flotação	35
3.3. Briquetes compostos por resíduos de poda urbana e papelão ondulado	38

3.4. Briquetes compostos por resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas	40
4. CONCLUSÕES	44
5. CONSIDERAÇÕES	45
6. REFERÊNCIAS	46
CAPÍTULO III	48
PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PELLETS COMPOSTOS POR DIFERENTES PROPORÇÕES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	48
Palavras-Chave: energia da biomassa, resíduos sólidos urbanos, pellets, normas para comercialização.....	48
1. INTRODUÇÃO	49
2. MATERIAIS E MÉTODOS	52
2.1. Materiais	52
2.2. Produção dos pellets	53
2.3. Propriedades físicas, químicas e mecânicas	54
2.4. Análise estatística	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
3.1. Pellets produzidos com resíduos de poda urbana e lodo de flotação	57
3.2. Pellets produzidos com resíduos de poda urbana e papelão ondulado	60
3.3. Pellets produzidos com resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas 63	
4. CONCLUSÕES	66
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
CONCLUSÕES GERAIS	70

RESUMO

SOUZA, Marina, Moura, *D Sc.* Universidade Federal de Viçosa, Junho de 2014. **Propriedades de briquetes e pellets produzidos com resíduos sólidos urbanos.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientadores: Benedito Rocha Vital e Cláudio Mudado Silva.

Este estudo teve por objetivo pesquisar diversos tipos de resíduos sólidos urbanos para a produção de combustíveis compactados. Foram selecionados resíduos de poda de árvores, papelão ondulado, embalagens cartonadas e lodo de tratamento de águas pela técnica de flotação. Optou-se por estes materiais devido a sua representatividade no ambiente urbano, pela facilidade em encontrá-los e também por haver poucos estudos relacionados a eles. O trabalho foi dividido em três etapas, inicialmente, foram determinadas as características físicas, químicas e térmicas dos resíduos como forma de embasamento para os próximos capítulos. Na sequência foram produzidos briquetes compostos por diferentes proporções destes resíduos, usando como base para as misturas os resíduos de poda de árvores devido sua composição lignocelulósica; também foram feitas análises químicas e físicas nos briquetes para avaliar se o processo de compactação das misturas foi eficiente e se o produto final apresentou características energéticas favoráveis ao uso. Finalmente, avaliou-se a produção de pellets produzidos com os resíduos sólidos urbanos, e da mesma forma, utilizaram-se os resíduos de poda urbana como base para as misturas com os outros materiais. Após as análises observou-se que, os resíduos de poda urbana, papelão ondulado e embalagens cartonadas

apresentaram características favoráveis para o uso como biocombustível, porém o lodo de flotação apresentou caráter inorgânico, com baixo poder calorífico e alto teor de cinzas. Apesar disso, o lodo foi utilizado para a produção dos briquetes e pellets com o intuito de avaliar possíveis misturas que minimizem estes problemas. Tanto para os briquetes quanto para os pellets, observou-se que a adição de lodo na composição destes materiais proporcionou incrementos na resistência e densidade, porém reduziu o poder calorífico e aumentou o teor de cinzas. A incorporação de papelão ou embalagens cartonadas ocasionou aumento na densidade e na resistência e uma pequena redução no poder calorífico. Conclui-se que os resíduos sólidos urbanos utilizados neste estudo apresentaram potencial para produção de combustíveis compactados, tornando-se uma alternativa sustentável para produção de energia, desde que otimizadas as proporções das misturas de materiais.

ABSTRACT

SOUZA, Marina, Moura, D. Sc. Universidade Federal de Viçosa, June, 2014. **Properties of briquetts and pellets made by urban solid residues.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-Advisors: Benedito Rocha Vital and Claudio Mudado Silva.

This study aimed to investigate different types of materials for the production of compressed biofuel. The selected materials were: tree pruning waste, corrugated cardboard, cartons and sludge of water treatment obtained by flotation technique; these materials were chosen because of its abundance in the urban environment, the ease of finding them in urban areas and also the few studies related to them. The study was divided into three chapters: in chapter I, was determined the physical, chemical and thermal characteristics of the residues to give support for the subsequent chapters. In chapter II briquettes composed of mixtures of these residues were produced, using the urban pruning residues as the basis for the different blends, mainly because of its lignocellulosic composition; chemical and physical analysis were also made in the briquettes to analyze if the compactation process of the mixtures was effective and if the final product has favorable characteristics for energy use. In chapter III was described the production and evaluation of pellets composed by municipal solid waste, and similarly, we used the urban pruning residues as the main material for the blends with the other materials. After all analysis, it was observed that the urban pruning residues, the corrugated cardboard and the aseptic cartons showed positive characteristics for use as biofuel, but the flotation sludge showed an inorganic character, presenting a low

calorific value and high ash content. Nevertheless, the sludge was used for the production of briquettes and pellets in order to evaluate possible mixtures to minimize those problems. Even for the briquettes or for the pellets it was observed that the addition of sludge in the composition provided increases in the strength and density, but reduced the calorific value and increased the ash content. The incorporation of cardboard or carton caused an increase in density and strength and a small reduction in calorific value. It could be concluded that the municipal solid residues used in this research had characteristic to use them to produce compressed fuels as a sustainable alternative for energy production. Regards about the mixing ratios of the residues should be taken to optimize the overall process.

INTRODUÇÃO GERAL

Os problemas relacionados ao meio ambiente devido à dependência energética de combustíveis fósseis têm demandado um constante desenvolvimento de novos modelos sustentáveis e renováveis de obtenção de energia, estes devem ser economicamente eficientes, tecnicamente viáveis e principalmente capazes de suprir a demanda crescente de energia, tanto em escala local quanto mundial.

Os combustíveis fósseis não são apenas uma fonte finita de energia, mas também contribuem para o aquecimento global e desta forma, uma transição da matriz energética para uma mais limpa é requerida com frequência. Dentre as possíveis fontes alternativas de energia, os resíduos sólidos urbanos podem exercer um importante papel neste cenário, visto que a geração destes materiais no ambiente urbano pode ser considerado constante e também possuem a principal característica de serem uma fonte renovável e ambientalmente confiável para prover energia.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2007) é previsto que na geração de eletricidade haverá crescimento da participação de fontes primárias renováveis, como a eólica e a biomassa e ainda sugere que haverá aumento do aproveitamento de resíduos urbanos para a geração. Espera-se que a capacidade instalada de produção de energia via resíduos sólidos urbanos, segundo as opções tecnológicas disponíveis, seja na ordem de 1.300 MW no ano de 2030 considerando o aproveitamento de metade do volume de resíduo urbano produzido pelas 300 maiores cidades brasileiras.

Os resíduos sólidos urbanos geralmente possuem grande heterogeneidade, valores elevados de umidade, forma e granulometria irregular e baixa densidade a granel, o que por sua vez levam a dificuldades de manuseio, transporte, estocagem e utilização na sua forma original (Li e Liu, 2000; Kaliyan e Morey, 2009).

A fim de solucionar estes tipos de problemas, a densificação de resíduos é um processo que pode ser adotado para a produção de combustíveis sólidos mais eficientes, com melhores características energéticas, além de apresentarem boas vantagens para o transporte e a estocagem. Os combustíveis densificados podem ser facilmente utilizados em mecanismos de combustão direta, co-combustão, gaseificação e pirólise (Vinterbank, 2004; Kaliyan e Morey, 2009).

Os processos convencionais de compactação por pressão podem ser classificados em três tipos: extrusão, briquetagem e peletização (Li e Liu, 2000), que se diferenciam basicamente pelo tamanho, forma do produto e modo de utilização. Embora os mecanismos sejam diferentes, a densificação de materiais envolve as etapas de trituração, peneiramento, secagem, compactação e resfriamento. Na compactação propriamente dita ocorre o aumento da temperatura devido ao atrito entre as partículas, desenvolvendo mecanismos de ligações responsáveis pela estrutura física do produto final (Brand et al., 2009). Caso haja dentre as matérias-primas resíduos lignocelulósicos, a lignina irá plasticizar e agir como elemento ligante; caso não haja este componente é necessário adicionar substâncias capazes de estabelecer esta ligação.

Embora os combustíveis compactados apresentem diversas qualidades energéticas e operacionais quando comparados aos materiais *in natura*, há de serem observados vários fatores que podem afetar sua qualidade para utilização, dentre eles: a composição química, poder calorífico, distribuição granulométrica, umidade, conteúdo de cinzas e comportamento térmico (Maraver, 2013).

Desta forma, considerando a necessidade de pesquisas na área de utilização de resíduos sólidos urbanos para produção de energia, desenvolveu-se este estudo cujos objetivos foram: caracterizar, sob o ponto de vista energético, quatro tipos de resíduos sólidos comumente encontrados em centros urbanos; produzir e avaliar briquetes e pellets compostos por estes resíduos.

Sendo assim, para a apresentação dos resultados obtidos, esta tese foi estruturada em três capítulos, sendo que cada capítulo encontra-se na forma de artigo científico, conforme apresentado a seguir:

- **Capítulo I:** “Municipal solid waste assessment aiming the use as an energy source.”

- **Capítulo II:** “Produção e avaliação de briquetes compostos por diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos”.

- **Capítulo III:** “Produção e avaliação de pellets compostos por diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brand, M.A.; Muniz, G.I.B.; Valin, M.; Quirino, W.F. Influência da pressão e material nas propriedades de briquetes de biomassa florestal. **1º Congresso Brasileiro sobre Florestas Energéticas**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2009. Disponível em <<http://www.solumad.com.br/artigos/201011171819411.pdf>> Acesso em 21 de abril 2014.

Brasil, Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030**, Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, p.254, 2007.

Li Y, Liu H. High-pressure densification of wood residues to form anupgraded fuel. **Biomass Bioenergy**, v.19, n.3, p. 177–186, 2000.

Kaliyan N, Morey RV. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v.33, n. 3, p. 337-359, 2009

Maraver, A.G. **Optimization of the pelletization process of agricultural wastes originating from olive farms for their application in domestic boilers**. 2013. 275f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Meio Ambiente). Universidade de Granada. Granada. 2013. Disponível em <<http://hera.ugr.es/tesisugr/21863027.pdf>> Acesso em 21 de abril 2014.

Vinterbäck J, 2004. Pellets 2002: the first world conference on pellets. **Biomass and Bioenergy**, v.27, n 6, p. 513–520, 2002.

CAPÍTULO I

MUNICIPAL SOLID WASTE ASSESSMENT AIMING THE USE AS AN ENERGY SOURCE

ABSTRACT - This study aimed to assess the physical and chemical characteristics of four different residues normally found in metropolitan areas in Brazil. The studied residues were focused on tree pruning, used corrugated cardboard, used aseptic cartons and sludge from water treatment; they were evaluated according to their potential as a fuel. Several characterization analyses were done, including: classification, microscope analysis, ultimate and proximate analysis, minerals, X-Ray Fluorescence, Diffractometry and Thermogravimetric analysis. The results showed that all residues were classified as Class II, non dangerous. The flotation sludge doesn't have the potential to generate energy due to the high content of ashes and low energetic content. Pruning residues, corrugated cardboard and aseptic cartons showed potential for energetic use, but it should be considered the transportation logistics due to its particle size heterogeneity and density. According to this biomass characterization, the use of those solid residues showed alternatives sources for sustainable energy generation. It is recommended studies for agricultural or civil construction use of the flotation sludge.

Keywords: municipal waste, bioenergy, recycling, environmental impact

1. INTRODUCTION

Although the combustion of municipal solid waste (MSW) is a well-known practice all around the world, the waste management and its use is recent and is still not completely accepted by some countries, mainly to ensure the population health protection due to toxic air emissions. Widely applied in Europe, the incineration of waste is an operation of thermal destruction with energy recovery from residual waste, especially in the context of an integrated waste management system.

The use of high energy content biomass and other types of solid waste to partially supplement the use of fuels has great importance concerning about global energy supply, and also have the potential to decrease the amount of waste going to landfills as well as pollution .

According to this, in a research developed by regarding energy generation from waste, it was stated that the co-combustion of waste and biomass fuels in existing pulverized coal fired power plant could be an economical alternative to increase the usage of renewable fuels.

The perspective of increasing large-scale combustion of natural biomass and its co-combustion with semi-biomass (contaminated biomass such as municipal solid waste, refuse-derived fuel, sewage sludge, demolition wood and other industrial organic waste) and solid fossil fuels seems to be one of the main use for biofuel in many countries worldwide in the near future.

Apart from the converting equipment, the characterization of the fuel that will be used is one of the most important issues to be investigated for the purposes of renewable energy. The design and operation of biomass combustion systems heavily relies on biomass characteristics such as heating value, moisture content, elemental composition and ash properties . The inherent properties of the biomass or other residues determine the choice of conversion process and any subsequent processing difficulties that may arise . The composition of the biomass defines properties, quality and application

perspectives, as well as technological and environmental problems or advantages related to any fuel and its products . As an example of those characteristics, the heating value may vary greatly throughout different residues mainly because of composition differences. The heating value defines the energy content of a fuel and is one of the most important parameters used for design calculations and numerical simulations of thermal systems. This characterization is vital whether using direct combustion or co-firing with other fuels.

Regarding to the moisture content, residues that has high moisture content can cause issues during the firing process. This excess moisture could lead to poor ignition and reduces the combustion temperature affecting the combustion quality. Also, according to , high moisture content in fuels could affect the cost of acquisition, mainly because that the transported volume is going to be less that the maximum possible.

Other factors involving the biomass characterization for energy source are the fixed carbon and volatile matter, which consists of chemical energy, stored in the form of those compounds . Fixed carbon and volatile matters can provide a measure of how easy the material could be ignited, the high content of volatile substances can improve the ignition and burn process, although the combustion is expected to be fast and difficult to control. The high volatile matter contents are also expected to affect the overall combustion process.

In addition, the composition of biomass ashes depends on various factors but is directly related to the used biomass because the original constituents in it are the precursors for the formed compounds during and after the burning process. Detailed knowledge of the fuel composition is extremely important for the ash characterization and the systematic identification, quantification and characterization of chemical and phase composition of a given fuel and its conversion products are the initial and most important steps for their proper utilization .

Inorganic elements can negatively affect to the combustion process. Sulfur and chlorine can reduce the melting point of the ash causing operational problems in combustion, such as formation of deposits (slagging) in the furnace (ÖHMAN AND NORDIN, 1998). Sulfur and chlorine can reduce the protective oxide layer in the furnace because of its corrosive character. Chlorine can induce, e.g., formation of extremely toxic dioxins.

Potassium content influences the ash melting behavior and aerosol formation. An increased potassium content leads to a decreased ash melting point, which can cause slag and hard deposit formation in the furnace and boiler. Moreover, increased

potassium concentrations rise the amount of aerosols formed during combustion and thus fouling in boilers and fine particulate emissions. Alkali and alkaline earth metals, in combination with other fuel elements such as silica and sulfur, in conjunction with chlorine, are responsible for many undesirable reactions in combustion furnaces and power boilers .

It is necessary to include in the biomass characterization its pyrolysis characteristics examined by thermogravimetric analysis (TGA). The weight loss curve (TG) and the corresponding differential weight loss curve (DTG) could be regarded as a personal identification of the material and could help to understand its behavior during the combustion process .

One of the main reasons why solid municipal residues are not widely used is the lack of information regarding feeding process, combustion assessment as well as emission characteristics and implications. This is key for design and development of the combustion systems along with their efficiency.

This study aimed to assess the physical and chemical characteristics of four different residues normally found in metropolitan areas in Brazil. The studied residues were focused on tree pruning, used corrugated cardboard, used aseptic cartons and sludge from water treatment and evaluated for their potential as fuel.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Materials

Tree pruning residues were collected in the pruning processing center in the city of Santo Amaro, located in the State of Sao Paulo – Brazil, these residues came from the pruning activities in the South area of Sao Paulo city. It was collected around 0.95m³ of processed material in the form of chips. Then, the chips were placed in area to allow them dry at 25°C and 60% humidity.

According to data provided by the municipal agency, the species that are most planted in the metropolitan area of Sao Paulo State are *Ficus sp.*, *Caesalpinia peltophoroides*(Benth), *Licania Tomentosa*(Benth), *Tabebuia sp.* and *Largestroemia indica*(L.) so, the sample was composed mainly by those species but also by some grasses, palms petioles and materials partially decomposed. The percentages could not be estimated because of the process collect process used.

The corrugated cardboard and the aseptic cartons (milk carton) were obtained in waste sorting centers from the city of Vicoso – Minas Gerais State, Brazil. Those centers are responsible for the separation of the dry waste (plastic, paper, glasses and metals) collected in the city and for the shipment of them to recycling industries. Aseptic cartons consists on several layers of paper (cardboard), low density polyethylene and aluminum, most commonly in the proportions of 75, 20 and 5%, respectively, and they are commonly found in domestic residues; corrugated cardboard can be found in the disposal waste from grocery stores, furniture stores and other sectors that sell/purchase packed products. Both materials collected for this research were without any visible dirty, oil slick and plastic. For this study it was collected approximately 20kg of each material without any kind of processing or transformation and in the room humidity.

The fourth studied residue, the water treatment sludge, was collected in the flotation system of Empresa Metropolitana de Aguas e Energia (EMAE), in the city of São Paulo, Brazil. EMAE is an agency responsible of the hydrological and quality control of the Pinheiros and Tiete Rivers, the Billings Dam and the Henry Borden hydroelectric plant. Pinheiros and Tiete rivers are two of the most important rivers in Sao Paulo in terms of economy of the State, and also they are one of the most polluted in Brazil. The water treatment plant was placed in Pinheiros River in order to make the water usable for the hydrological and electrical framework by using chemical and mechanical process. Also, this flotation process leads to the production of large amounts of sludge that can arise in disposal and creates environmental problems.

For this research, it was collected about 0.5m³ of sludge from the disposal area of EMAE flotation system, once the material arrived to the research laboratory, it was spread out in an open area under sun for drying.

2.2.Methods

For the residues classification, the leachate and solubilized tests were done according to the NBR 10.004 (ABNT, 2004) standard. Inorganic compounds were determined in the liquid extracts, leachate and solubilized at the Atomic Absorption Laboratory of Federal University of Viçosa. The inorganic parameters (arsenic, barium, cadmium, lead, selenium, chromium and silver) were determined in a Perkin Elmer plasma spectrophotometer using a multi-element curve; fluoride was determined using the potentiometric method.

The pruning residues and the sludge were air dried with daily rotation during ten days, for the other materials it were not necessary the drier process. After drying from 60% to 12%, the sludge was in the form of powder, so it was not further processed, the other materials were prepared using a grinder with a 6mm sieve and subsequently were sieved in accordance with the desired analyses.

For the microscope characterization, one sample of each material was first metallized with gold during 2 minutes in an Electron Microscopy Sciences 550X metalizer using argon vacuum. For the visualization it was used a scanning electronic microscope LEO Elektronen Mikroskopie 1430 VP. with nitrogen vacuum. It was done for the four residues and also for the ashes of each of them. The ashes were collected from the proximate analyses.

The moisture content was determined by the difference between the weights before and after drying in oven at 105 ± 3 °C until constant weight in accordance with NBR 7993 (ABNT, 1983).

The bulk density was determined according to NBR 6922 standard (ABNT, 1981). For the granulometric evaluation, 2.0 kg of residues were sieved in sieve set of 2.5, 1.0 and 0.5mm, this was done only with the tree pruning residues due to its natural variability.

For the thermo-gravimetric analysis, DTG-60H Shimadzu equipment was used in a nitrogen atmosphere in a constant output of $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, using at least 2.0mg of sample selected from a sieve set of 0.074 and 0.053 mesh. The thermograms were got from 50°C until the maxima temperature of 550°C, with a heating ramp of $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.

The ultimate analyses were done in accordance with the methodology showed by Paula et al. (2011), using an Elemental equipment Vario Micro Cube CHNS-O. The gases used to do the carry and the igniting were helium and oxygen, respectively. The bulb combustion temperature was of 1.150°C.

The volatiles, and ashes matter were done using the NBR 8112 (ABNT, 1986) standard replacing the platinum melting pot for porcelain and the temperature of 750°C for 600°C.

The higher calorific value was determined using an adiabatic calorimeter in accordance with the NBR 8633 (ABNT, 1981) standard.

For the determination of the major elements, the samples were submitted to a nitroperchloric digestion (4:1 v/v), detection of P and B was by colorimetric; K by photometric. Ca, Mg, Mn, Cu, Fe and Zn by atomic absorption, S by turbidimetric, N using the Kjeldahl method (EMBRAPA, 1997).

The X-Ray Fluorescence and X-Ray Diffractometry (XRD) analyses were done in the Laboratory of Technology Characterization of the Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. The X-Ray Fluorescence determines the oxides in the materials and that percentage. It was done by a semi quantitative analysis, through the elements flour to uranium in an x-ray spectrophotometer Axios Advanced (PANalytical) with fire loss at 1050°C during one hour.

The diffraction analysis was done in the equipment PANalytical, X'Pert with X' Celerator and the identification of the phases were done in the database PDF2 from ICDD – International Centre for Diffraction Data (2003) and PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007).

For this analysis the samples were pyrolyzed and the extracts compounds were analyzed on a gas chromatograph with a mass spectrophotometer (CG/EM– IT Saturn 2100D) linked. The sample pyrolysis was done in the maximum temperature of 550°C during one hour. The proceeds were done by the “Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas”.

3. RESULTS

The urban pruning residues, corrugated cardboard and aseptic cartons were classified as *RESIDUE CLASS II – not dangerous*, according to the Annex H of the NBR 10.004 standard, whose identification code are A009 for the pruning residues, A006 for the corrugated cardboard. There is no specification for the aseptic cartons but it could be inserted as A006 because it does not contain substances from the annex C, D or E.

The air dried sludge flotation was classified as *RESIDUE CLASS II A - not dangerous, not inert*, with the presence of the following nonconforming parameters in the solubilized extract (mg/l): arsenic (0.044), lead (0.52), phenol (0.72), iron (2.52), sulfate (340) and surfactants (2.12). Inflammability, corrosivity, toxicity and reactivity were not applicable for the sludge.

Among the analyzed parameters in the flotation sludge, it can be notice that the concentration of iron is probably due to the flotation treatment system that is mainly composed of iron based polymers, therefore the obtained values can be changed by process control and polymers dosage.

Considering that the solubility test has the objective to predict, under extreme conditions, which inorganic elements could leachate in the soil, it is necessary to emphasize that the sludge disposal on the soil, even in low humidity conditions should be deeply studied.

Rodrigues (2010) studied biologic sludge from the Kraft pulp classified it as Residue Class II, showing high concentrations of barium, cadmium and mercury. In the same way, Flohr et al. (2005) classified several solid residues and sludge from sewage treatment also as Class II.

An initial material characterization was done by a scanning electron microscopy (SEM) as shown in the Figure 1.

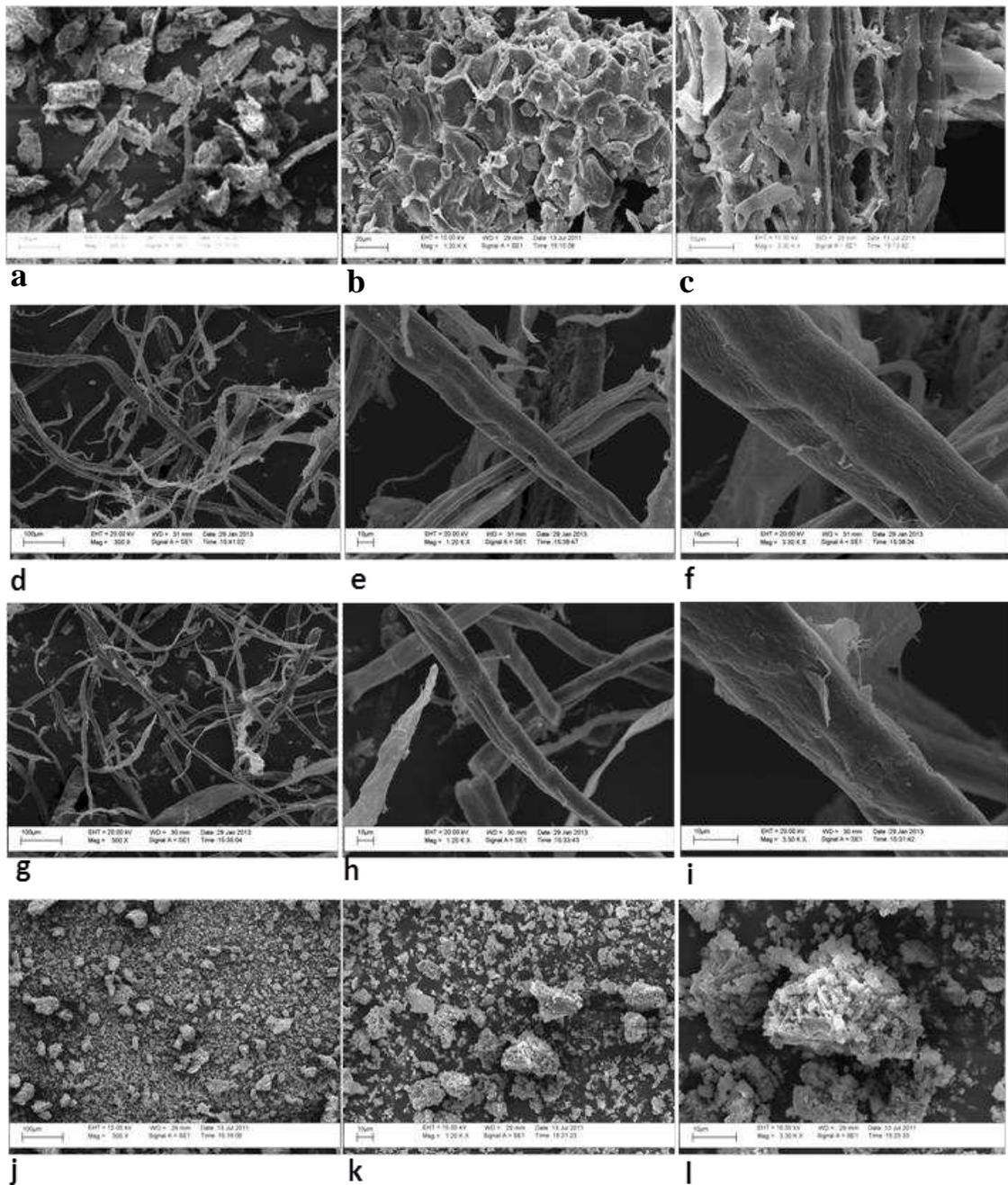


Fig. 1. SEM of the tree pruning residues (a,b,c), corrugated cardboard (d,e,f), aseptic carton (g,h,i) and flotation sludge (j,k,l).

It can be noticed in the Figure 1 (a-c) the presence of structural vegetal traces arising from tree pruning residues, showing details of fibrous, vascular and parenchymatous material, as could be expected for woody biomass; 1 (d-f) and (g-i); pictures 1 (j-l) shows some clusters of metallic oxides with a rounded and tetrahedral aspect.

Results from moisture content, bulk density, proximate and ultimate analyses are presented in Table 1 to 3. Bulk density is very low for the corrugated cardboard and

aseptic cartons compared to the pruning and sludge residues, the low density of the residues could lead to problems during processing, transportation, storage and also the burning process.

Table 1.Moisture content (M), bulk density (BD) and heating value (HCV) of the residues

Material	M (% (d.b.))	BD (g.cm⁻³)	HCV (Kcal/Kg)
Tree pruning	10.42 (0.29)	0.24 (0.87)	5059(3.54)
Corrugated cardboard	9.58 (0.28)	0.03 (0.28)	4220(66.67)
Aseptic carton	4.99 (0.22)	0.03 (0.22)	4412 (30.44)
Sludge	11.36 (0.42)	0.69 (0.41)	1338(25.42)

(...) standard deviation

Table 2.Volatiles (V), Fixed Carbon (FC) and Ash (A) content of the residues

Material	Proximate Analysis (%(d.b))		
	V	FC	A
Tree pruning	77.87 (0.67)	16.90 (0.70)	5.23 (0.03)
Corrugated cardboard	87.42 (1.89)	8.66 (1.87)	3.92 (0.6)
Aseptic carton	85.06 (0.60)	9.94 (0.79)	5.00 (0.08)
Sludge	41.36 (0.06)	-	64.54 (0.65)

(...) standard deviation

Table 3.Ultimate analysis of the residues

Material	Ultimate Analysis (%(d.b))				
	C	H	N	S	O
Tree pruning	41.16 (1.19)	5.41 (0.19)	2.26 (0.09)	0.20 (0.03)	45.75 (0.69)
Corrugated cardboard	41.57 (0.66)	6.08 (0.09)	1.07 (0.03)	0.14 (0.03)	47.23 (0.35)
Aseptic carton	43.35 (0.08)	6.36 (0.03)	0.92 (0.04)	0.06 (0.0)	44.31 (0.04)
Sludge	12.2 (0.31)	2.38 (0.03)	2.59 (0.14)	1.68 (0.04)	16.61 (0.07)

(...) standard deviation

Moisture content ranged for all residues from 4.99% to 11.36% dry basis and could be considered appropriate for use as an energy source. The combustion reaction is exothermic, the evaporation of water is strongly endothermic, so the autothermal limit (self-supporting combustion) for most biomass fuels is around 65% content wet basis (40% dry basis), below this point there is not sufficient energy liberated by combustion to satisfy the evaporation and product heating. It is also important that the presence of moisture greatly delayed the volatiles release and forms a large quantity of flue gas during the combustion which eventually leads to large dimensions of the equipment for flue gas treatment (WERTHER et al., 2000). Although, some moisture could be necessary to increase the devolatilization time and help the total control of the process.

During the devolatilization, the biomass residues went through a thermal decomposition proceeded to the release of volatiles and formation of tar and char, the quantity of those products depends on the type of the residues. In this research, the higher volatile matter was found for the corrugated cardboard and for the aseptic cartons, which presented averages over 80%, those values could indicate that these residues are easier to ignite and burn, but care should be taken in order to achieve the complete combustion of the gases, ensuring the combustion efficiency and the low emissions of CO and hydrocarbons (WERTHER et al., 2000).

It should be highlighted that the volatile matter of the sludge is low (41.64%), compared to the other materials, which seems to be a problem for the combustion process. Also, the sludge presents extremely high percentage of ashes indicating negative contribution to the heating value. The correlation between heating value and volatile matter is not clearly predicted for biomass, but some authors used to say that each 1% increase in ash translates into a decrease of 0.2MJ.Kg^{-1} (47.64 kcal/kg), so wood with less than 1% of ash typically have heating values near 20 MJ.Kg^{-1} (4,767Kcal/kg).

It can be noticed that the C, H and O content were very similar for the tree pruning, cardboard and cartons, at about 40%, 6% and 45% respectively. C and H are oxidized during combustion by exothermic reactions forming CO_2 and H_2O also contributing positively for the heating value and O contributes negatively (OBERNBERGER, et al, 2006). Comparatively, the sludge presented low contents of C, H and O, although the low content of O maybe good for burning purposes, these residues do not contain considerable amount of C and H able to oxidize and give notable exothermic energy to the system.

The nitrogen content reached the lowest value for the aseptic cartons and the highest for the tree pruning residues. Nitrogen content is almost entirely converted into gaseous N₂ and nitric oxides. In a great part of solid biofuel furnaces there are low formation of oxides because of the efficiency of the combustion, due to this, in the case of woody biomass only a small amount of N is incorporated in the ashes. For the sulfur content, the highest value was obtained for the sludge which could mainly form gaseous SO₂ and alkali or earth-alkali sulphates. Those sulphates could condense on the heat exchanger surfaces or form fine fly ash particles, although for woody biomass about 60% of the S could be incorporated to the ash.

studied the composition of cardboard, waste wood and milk carton and found values very similar to the ones found here. Proximate analysis indicated volatile matter of 79% to cardboard, 76% to waste wood and 82% to milk carton; the ash content were 10% for cardboard, 19,98% for waste wood and 7,2% for milk carton. The high calorific value found by Jenkins was 3435 KCal/Kg for cardboard, 4095 KCal/Kg the waste wood and 5229KCal/Kg for milk carton.

Regarding to the major elements content, in Table 4 is showed the portions of some alkali metals, alkaline earth metals and transition metals of the studied materials.

Table 4. Major elements of the residues

Material	N	P	K	Ca	Mg	S
	(%)					
Tree pruning	0.46	0.10	0.48	1.56	0.01	1.29
Corrugated cardboard	0.11	0.01	0.01	3.65	0.34	0.21
Aseptic carton	0.08	0.00	0.01	3.92	0.19	0.16
Sludge	0.70	2.48	0.26	0.39	0.06	1.84
Material	Zn	Fe	Mn	Cu	B	
	(ppm)					
Tree pruning	14.60	86.70	10.30	7.00	210.10	
Corrugated cardboard	41.10	580.10	42.80	18.80	67.90	
Aseptic carton	18.40	271.00	21.20	30.10	13.40	
Sludge	3057.50	75805.00	93.50	760.00	1.80	

The nitrogen content for the tree pruning residues was similar for the ones found in the literature for logging residues (0.5%) and deciduous wood with bark (0.3%); the lowest value was found to the aseptic carton and the highest for the sludge. Sulfur content for the studies residues were higher than those found which were at about 0.1%. Between the biomass materials, coniferous and deciduous wood has the lowest N content and higher concentrations are found in bark, logging residues, short rotation

coppice and different straws . Also the N associated with fuels is almost converted to the gaseous phase during combustion, oxidized into oxides as NO_x groups that acts as acids and could contribute to corrosion in boilers and causes acid-rain, and into N₂O groupsthat could contribute as an ozone depleting gas .

Elements such as Ca, Fe, K, Mg, Na and P in biomass were considered as ash-forming elements and it is very important for the thermochemical conversion process, it is generally know that alkali metals are the main cause of slagging, fouling and sintering . In the present research is showed that Ca and Mg portions for sludge and tree pruning were lower than for the cardboard and cartons; Zn and Fe content of the sludge were much higher comparing to the other materials and could be caused by the process of flotation that uses coagulant agents. These elements have also great interest in soil improvement by using the ashes of biomass as fertilizers.

The oxides compounds found in the residues and the respective percentages are presented in Table 5. For the tree pruning it was observed that the concentration of SiO₂ is higher than Al₂O₃, and also there are high portions of CaO, MgO, K₂O, Na₂O, SO₃and P₂O₅in accordance with which describe for general biomass. The Al₂O₃ content of the aseptic cartons was the highest because of its principal composition, followed by the sludge as a result of its manufacturing process.

Table 5.Percentage of oxides in the residues

Oxide	Tree pruning	Corrugated cardboard	Aseptic carton	Sludge
Na ₂ O	0.11	0.13	0.2	nd
MgO	0.44	0.1	nd	0.14
Al ₂ O ₃	0.38	0.93	8.06	5.16
SiO ₂	1.84	1.02	1.02	6.96
P ₂ O ₅	0.44	0.03	0.02	4.17
SO ₃	0.95	0.37	0.46	7.83
Cl	0.28	0.06	0.11	0.07
K ₂ O	1.35	0.03	0.08	0.22
CaO	4.85	1.32	4.81	0.91
TiO ₂	0.04	0.05	0.07	0.24
V ₂ O ₅	nd	-	-	nd
Cr ₂ O ₃	nd	0.01	nd	0.02
MnO	0.01	0.01	0.03	0.03
Fe ₂ O ₃	0.37	0.14	0.29	54.3
Co ₃ O ₄	nd	-	-	nd
NiO	0.01	<<	0.01	0.01
CuO	0.01	<<	0.01	0.08
ZnO	<<	0.01	<<	0.13
Br	-	<<	nd	-
Rb ₂ O	nd	-	-	nd
SrO	0.01	0.01	0.01	0.01
ZrO ₂	nd	nd	0.02	0.01

to be continued...

Table 5. to be continued...

Nb ₂ O ₅	nd	-	-	nd
MoO ₃	nd	-	-	nd
WO ₃	nd	-	-	nd
PbO	nd	<<	0.01	0.01
FL	88.9	95.8	84.8	19.7

nd = oxide no detected; << = less than 0.01%; - = no determined; PF = Fire Loss

Chlorine content of tree pruning was the highest among the residues, this element has an important role in alkali transportations and vaporization, forming important slagging indicators and according to a slagging and fouling indices, percentages lower than 0.2 indicates low slagging inclination and between 0.2 and 0.3 medium inclination (MAISA, *et al.*, 2007).

An important observation should be taken to the high content of Fe₂O₃ in the sludge that was 54.3%, in accordance with a value 19.3 % for iron oxides in biomass was considered extremely high, but since this sludge has low organic compounds, the inorganic phase was very predominant and certainly leads to a non-energy use of it.

To complete the oxide characterization of the residues, in Table 6 is showed the XRD patterns of the four materials, in which was not found any compound in the corrugated cardboard, mainly because of its original organic composition and for the aseptic cartons there was only Aluminum also due to its original composition (aluminum and plastic layers).

Table 6. XRD of the residues

Material	Compound Name	Chemical Formula
Tree pruning	Whewellite	C ₂ CaO ₄ H ₂ O
	Quartz	SiO ₂
Corrugated cardboard	-----	-----
Aseptic cartoon	Aluminum	Al
Sludge	Siderite	Fe(CO ₃)
	Graphite	C
	Quartz	SiO ₂
	Sulfur	S ₈
	Chamosite	Fe ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	Vivianite	Fe ₃ (PO ₄) ₂₈ H ₂ O*
	Berlinita	AlPO ₄
Ilite	(K.H ₃ O)Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	

The composition of the tree pruning is mainly limited to the minerals previously identified and discussed, with the presence of Si and Ca compounds. As it was reported, among the four studied residues, the sludge is the most heterogeneous and has a strong inorganic characteristic; this was confirmed by the XDR analyses, in which was found

the presence of three different Fe based compounds, C in a crystalline phase and quartz. Although, those compounds after the combustion process are going to constitute the ash and silicon oxide. It is important to note that calcium phosphate and iron oxide are considered nonhazardous (NOWAK, et al., 2013).

After this chemical characterization, the corresponding differential weight loss curve.

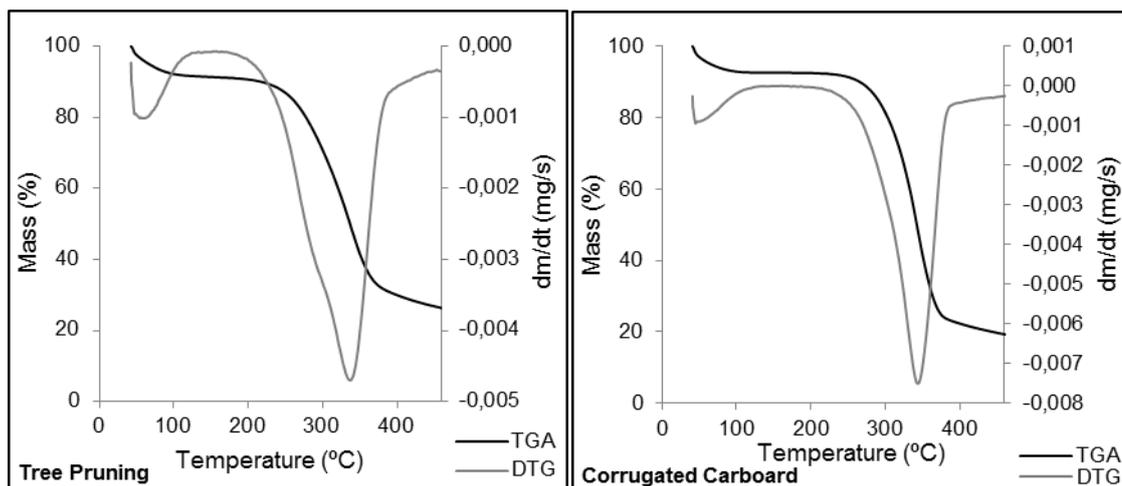


Fig. 2a. TGA e DTG curves of tree pruning and corrugated cardboard

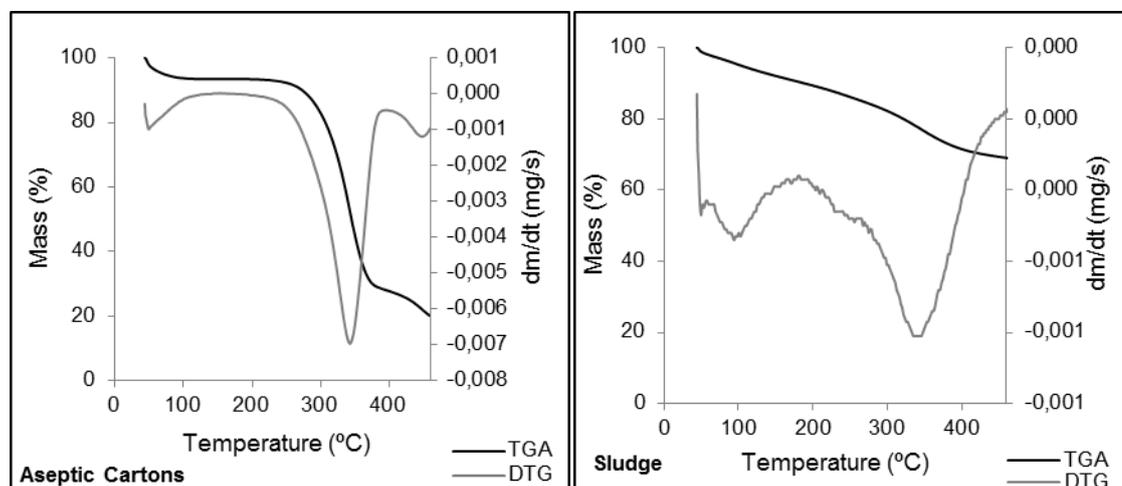


Fig. 2b. TGA e DTG curves of aseptic carton, sludge.

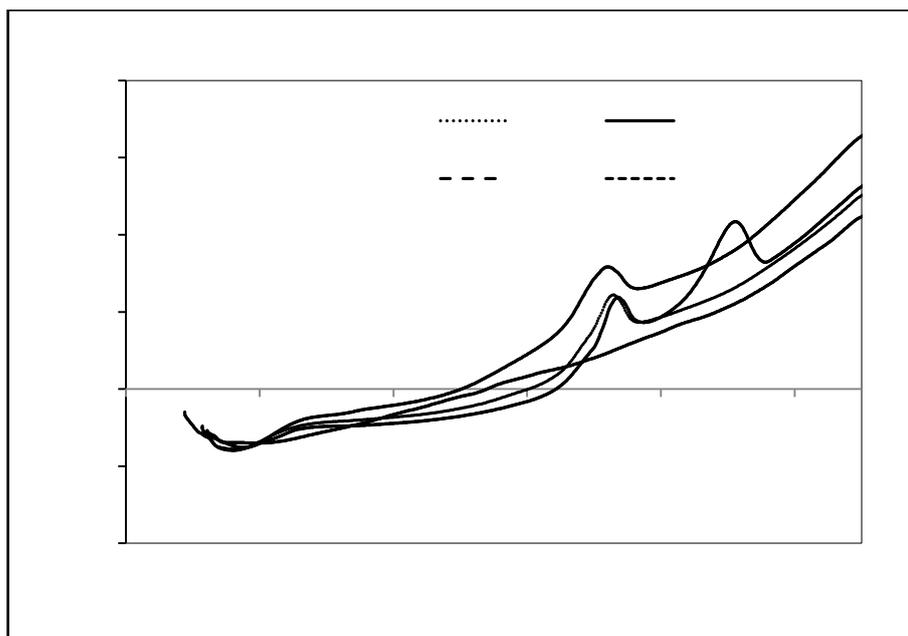


Fig. 3. DSC curves of tree pruning, corrugated cardboard, aseptic carton, sludge.

Following the weight loss corresponding to moisture loss (below 105°C) the curves for the tree pruning, corrugated cardboard and aseptic cartons showed the cellulose weight loss peak in which the maximum degradation is in the temperature range from 300 to 375°C. In a research developed by was noted that all wood based material reach the maximum pyrolysis rate at 361-372°C.

The corrugated cardboard weight loss was highlighted basically due to its homogeneous composition, the aseptic carton curve exhibited two mass loss steps between 200 and 500°C, the first devolatilization took place between 300 - 400°C and the second between 420 and 500°C. In accordance to the first peak is associated with the decomposition of cardboard layer while the second one with the decomposition of polyethylene. Also, suggested that the thermal degradation of the single components in the aseptic carton are independent during the heating period. The sludge curves showed thermo stability and low weight loss as it was expected due to the high inorganic matter and because of this, its residual mass was at about 70%.

Finalizing the assessment of the studied solid residues, Table 7 shows the chromatography analyses aiming a more detailed characterization of the gases produced during the controlled pyrolysis of them.

Table 7.Chromatography of tree pruning, corrugated cardboard, aseptic carton and sludge.

Compound	Percentage (%)			
	Tree pruning	Corrugated Cardboard	Aseptic carton	Sludge
Azulene	0,0	0,0	0,0	0,7
Benzene Pentyl	0,0	0,0	0,0	0,8
Butyl Octyl Benzene	0,0	0,0	0,0	1,1
Diethyl Phtalate	0,0	0,6	0,0	0,0
Dimethoxy Phenol	4,7	1,6	0,0	0,0
Dimethoxy Phenyl Ethanone	1,8	0,0	0,0	0,0
Dimethoxy Propenyl Phenol	2,6	0,0	0,0	0,0
Dimethyl Hexene	0,0	0,0	0,0	0,8
Dimethyl Octene	0,0	0,0	0,0	0,5
Dimethyl Furane	0,0	10,8	0,0	0,0
Dodeca methylcyclohexane exassi lozano	0,0	0,0	6,8	0,0
Ethinyl Pyridine	0,0	0,0	0,0	2,5
Ethyl Benzene	3,0	6,8	2,7	5,5
Ethyl Benzene Decile	0,0	0,0	0,0	0,7
Ethyl Toluene	1,2	0,0	0,0	0,0
Ethylhexyl ester propenoic acid	0,0	0,9	0,0	0,0
Furancarboxaldeído	10,5	0,0	0,0	0,0
Hexene	0,0	1,3	0,0	0,0
Hexyl Benzene	0,0	0,0	0,0	0,9
Isopropyl Furanone Dihydro	0,0	5,1	0,0	0,0
Limonene	2,1	0,0	0,0	0,0
Methoxy Methyl Phenol	1,5	3,5	0,0	0,0
Methoxy Phenol	5,8	3,5	2,4	0,0
Methoxy Propenyl Phenol	1,8	0,0	0,0	0,0
Methoxy Vinyl Phenol	2,2	0,6	0,0	0,0
Methyl Cyclepentenone	1,6	0,0	0,0	0,0
Methyl Furancarboxaldehyde	0,0	2,1	0,0	0,0
Methyl Heptene	0,0	0,0	0,0	1,6
Methyl Pentanone	0,0	0,0	0,0	0,3
Methyl Pirrole	4,0	0,0	0,0	0,0
Methyl Styrene	0,0	4,5	1,5	1,3
Methyl Thiophene	0,0	0,0	0,0	3,3
Methyl undecyl benzene	0,0	0,0	0,0	0,4
Metyl Nonadecyl Benzene	0,0	0,0	0,0	1,1
Nonane	0,0	0,0	0,0	1,1
Octane	0,0	0,0	0,0	1,2
Pentadiene Nitrile	0,0	0,0	0,0	10,9
Pental	0,0	0,0	2,5	0,0
Pentyl Heptyl Benzene	0,0	0,0	0,0	1,2
Pentyl Octyl Benzene	0,0	0,0	0,0	1,8
Propyl Benzene	0,0	0,0	0,0	1,3
Propyl Benzene Nonyl	0,0	0,0	0,0	0,7
Pyrrole	0,0	0,0	0,0	1,1

to be continued...

Table 7: to be continued...

Styrene	2,2	32,8	11,9	6,4
Toluene	21,5	10,7	7,4	24,8
Trimethoxy Benzene	2,4	0,0	0,0	0,0
Trimethoxy Methyl Benzene	2,2	0,0	0,0	0,0
Xylene	10,0	0,0	0,0	3,6

The main compounds detected for all four residues were hydrocarbons composed by 7 and 8 carbons, Styrene and Toluene. These compounds has the flash point of 31 7°C and 4,4°C respectively, those temperatures could be easily achieved in combustion cameras, so the compounds will be thermally degraded releasing after complete combustion CO₂ and water.

4. CONCLUSIONS

- All residues were classified as Class II, non dangerous.
- The flotation sludge doesn't have the potential to generate energy mainly due to the high content of ashes and low energetic content.
- Pruning residues, corrugated cardboard and aseptic cartons showed potential for energetic use, but it should be considered the transportation logistics due to its particle size heterogeneity and density.
- According to this biomass characterization, the use of these solid residues showed alternatives sources for sustainable energy generation.
- It is recommended studies for agricultural or civil construction use of the flotation sludge.

5. REFERENCES

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6922 – Carvão vegetal - Ensaios físicos determinação da massa específica (densidade a granel)**. Rio de Janeiro, 1981.

_____**NBR 7993 – Determinação da umidade da madeira por secagem em estufa quando reduzida à serragem**. Rio de Janeiro, 1983.

_____**NBR 8112 – Análise química imediata do carvão vegetal**. Rio de Janeiro, 1981.

_____**NBR 8633 – Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1986.

_____**NBR 10004 – Resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro, 2004a.

_____**NBR 10005 – Lixiviação de resíduos – procedimento**. Rio de Janeiro, 2004b.

_____**NBR 10006 – Solubilização de resíduos – procedimento**. Rio de Janeiro, 2004c.

_____**NBR 10007 – Amostragem de resíduos – procedimento**. Rio de Janeiro, 2004d.

_____**NBR 11941 – Determinação da densidade básica da madeira**. Rio de Janeiro, 2003.

ARSENAULT, R. H.; GRANDBOIS, M. A.; CHORNET, E.; TIMBERS, G. E. Pyrolysis of Agricultural Residues in a Rotary Kiln. v. 130, p. 337-350, 1980.

BELBO, H. **Technical Specifications for Solid Biofuels**. p.104. 2006

CUIPING, L.; CHUANGZHI, W.; YANYONGJIE; HAITAO, H. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 2, p. 119-130, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2nd ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p

FLOHR, L.; BRETANO, D.M.; CARVALHO-PINTO, C.R.S.; MACHADO, V.G.; MATIAS, W.G. Classificação de resíduos sólidos industriais com base em teste exotóxicológicos utilizando *Daphnia magna*: uma alternativa. **Biotemas**, 18 (2): 7-18, 2005. Disponível

em:<<http://www.biotemas.ufsc.br/volumes/pdf/volume182/p7a18.pdf>.> Acesso em 15.06.2012

GROSSO, M.; MOTTA, A.; RIGAMONTI, L. Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. **Waste Management**,v. 30, n. 7, p. 1238-1243, 2010.

HEIKKINEN, J. M.; HORDIJK, J. C.; DE JONG, W.; SPLIETHOFF, H. Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**,v. 71, n. 2, p. 883-900, 2004.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; JR, T. R. M.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**,v. 54, p. 17-46, 1998.

KORKMAZ, A.; YANIK, J.; BREBU, M.; VASILE, C. Pyrolysis of the tetra pak. **Waste Management**,v. 29, n. 11, p. 2836-2841, 2009.

MASIA, A. A. T., BUHRE, B.J.P., GUPTA, R.P., WALL, T.F. Characterizing ash of biomass and waste. **Fuel Processing Technology**, v. 88,p. 1071-1081,2007.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1) overview of biomass. **Bioresource Technology**,v. 83, p. 37-46, 2002.

NOWAK, B.; ASXHENBRENNER, P.; WINTER, F. Heavy metal removal from sewage sludge and municipal solid waste fly ash - A comparison. **Fuel Processing Technology**, v.105, p. 195-201, 2013.

OBERNBERGER, I.; BIEDERMANN, F.; WIDMANN, W.; RIEDL, R. Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. **Biomass and Bioenergy**,v. 12, n. 3, p. 211-224, 1997.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. **Biomass and Bioenergy**,v. 30, n. 11, p. 973-982, 2006.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and Bioenergy**,v. 27, n. 6, p. 653-669, 2004.

ÖHMANM, M.; BOSTRÖM, D.; NORDIN, A. Characterizations of inorganic particulate matter from residential combustion of pelletized biomass fuels. **Energy and Fuels**, v.18,n.2, p. 338-348.

PAULA, J. C. M. **Aproveitamento de Resíduos de Madeira para Confecção de Briquetes**.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2006. 48p.

RODRIGUES, V.A.J., **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. Viçosa, 2010.134p. Dissertação (Mestrado

em Ciência Florestal)- Departamento de Engenharia Florestal. Universidade Federal de Viçosa.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**,v. 28, n. 5, p. 499-507, 2005.

SINGH, S.; RAM, L. C.; MASTO, R. E.; VERMA, S. K. A comparative evaluation of minerals and trace elements in the ashes from lignite, coal refuse, and biomass fired power plants. **International Journal of Coal Geology**,v. 87, n. 2, p. 112-120, 2011.

SZYSZLAK-BARGŁOWICZ, J.; ZAJĄC, G.; PIEKARSKI, W. Energy biomass characteristics of chosen plants. **International Agrophysics**,v. 26, n. 2, 2012.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. **Fuel**,v. 105, p. 19-39, 2013.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. **Fuel**,v. 105, p. 40-76, 2013.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G.; MORGAN, T. J. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. **Fuel**,v. 94, p. 1-33, 2012.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE**,v. 26, p. 1-27, 2000.

WILLIAMS, A.; POURKASHNIAN, M.; JONES, J. M. Combustion of pulverized coal and biomass. **PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE**,v. 27, p. 587-610, 2001.

CAPÍTULO II

PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BRIQUETES COMPOSTOS POR DIFERENTES PROPORÇÕES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

RESUMO – 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 120°C 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

1. INTRODUÇÃO

Resíduos sólidos, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, são definidos como quaisquer resíduos que se apresentem nos estados sólido e semi-sólidos 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, de capinas e de poda (BIDONE e POVINELLI, 1999)

Independente da abrangência da definição, no Brasil tem-se 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 serem 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, 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 deste 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 tem-se 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 destaca-se 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 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.

2. MATERIAL 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 atividade 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 *Largestromia 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 águasdo 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%).

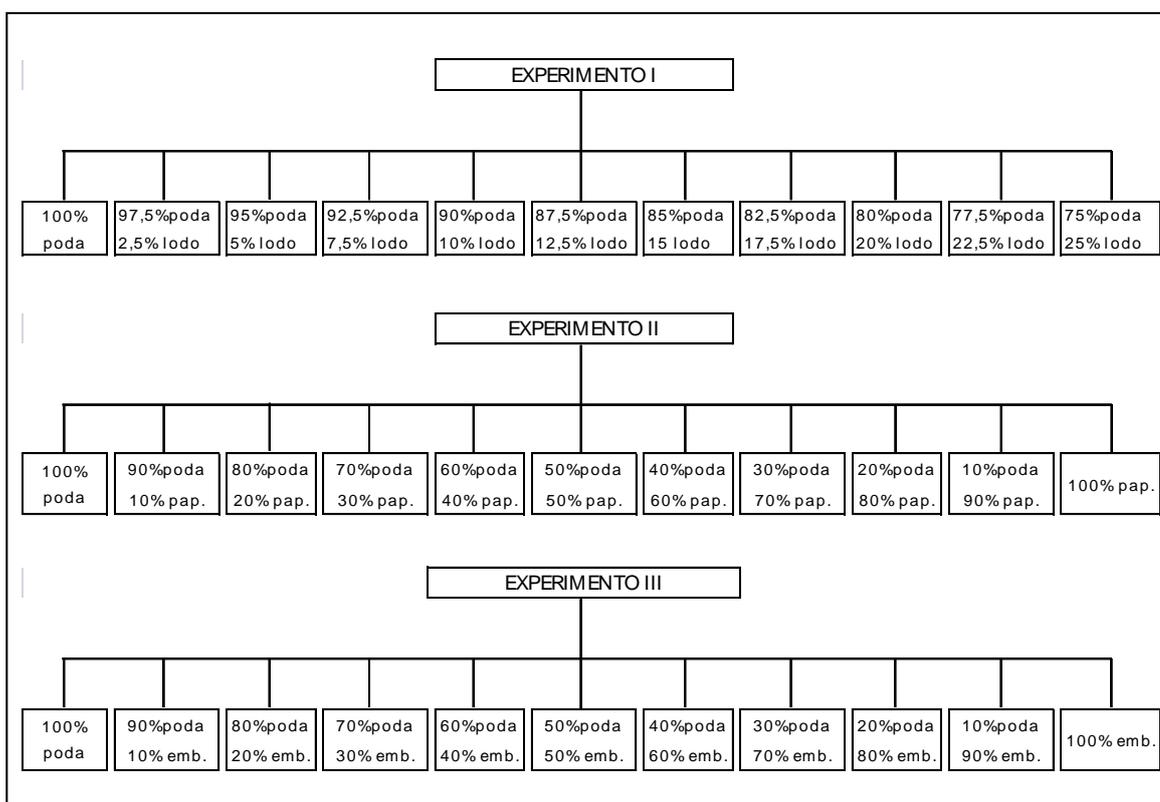


Figura 1 – Delineamento experimental utilizado para a produção dos briquetes a partir dos diferentes resíduos sólidos urbanos.

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.

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 ± 3 % de umidade e temperatura de 20 ± 3 °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:

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

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

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Características dos Resíduos sólidos urbanos

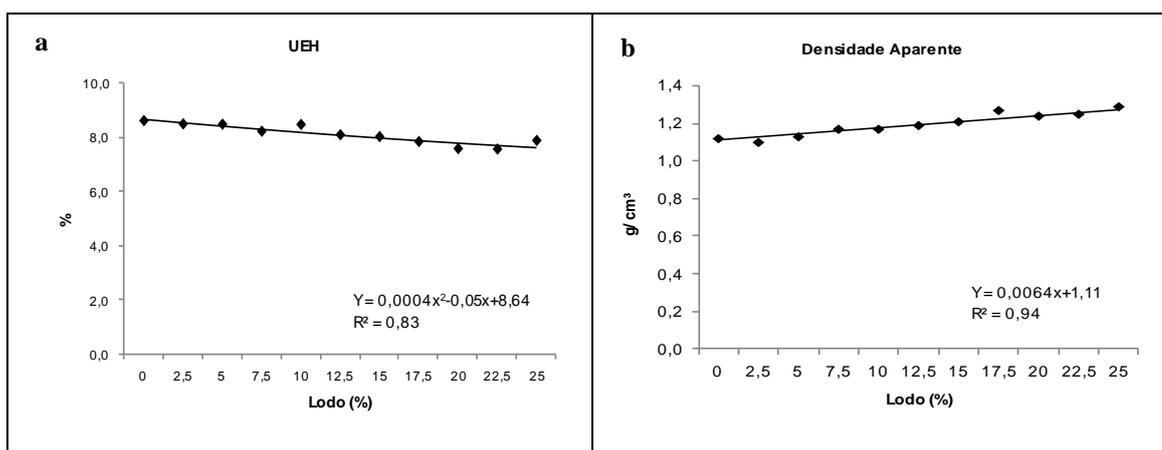
Na Tabela 1 são apresentadas as principais características dos resíduos utilizados para a produção dos briquetes, bem como a sua classificação quanto a periculosidade.

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

3.2. 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.



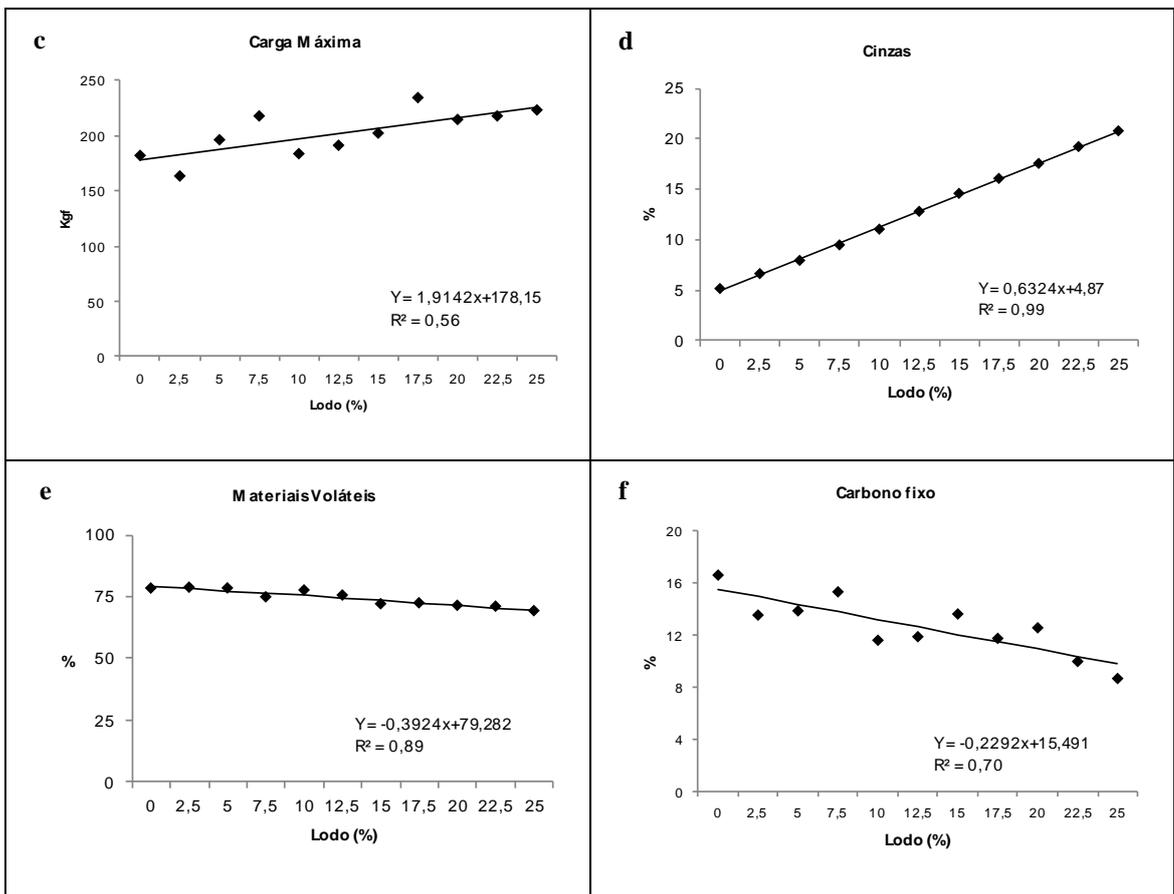


Figura 2 – Valores observados e estimados de umidade de equilíbrio higroscópico (%), densidade (g/cm³), carga máxima de ruptura (kgf) e percentual de cinzas (%), materiais voláteis (%) e carbono fixo (%) em função do teor de lodo presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

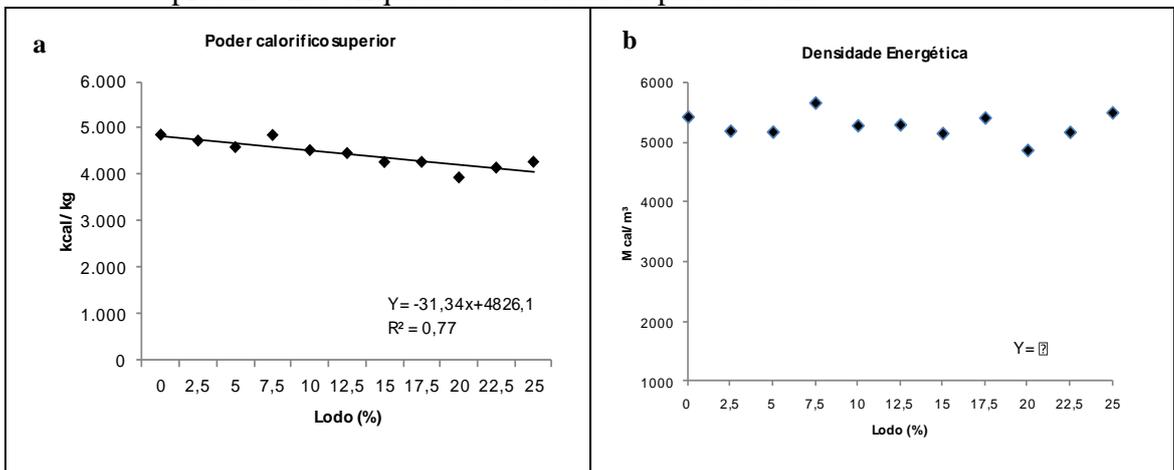


Figura 3 – Valores observados e estimados de poder calorífico superior (kcal/kg) e densidade energética (Mcal/m³) em função do teor de lodo presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

Na Figura 2a observa-se 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 e Morey, 2009). Dessa forma pode-se 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 conseqüentemente 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.

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 a 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.

3.3. 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.

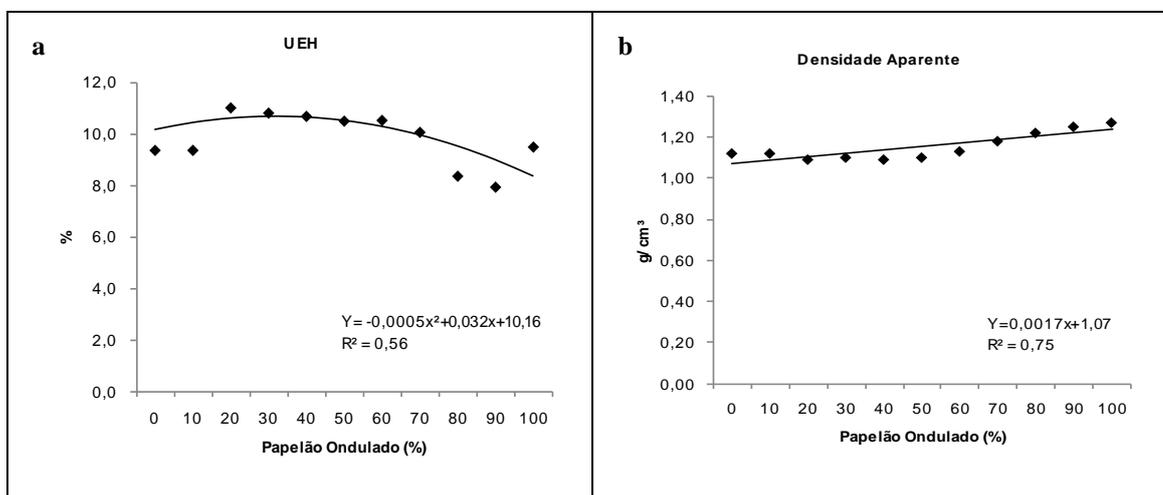
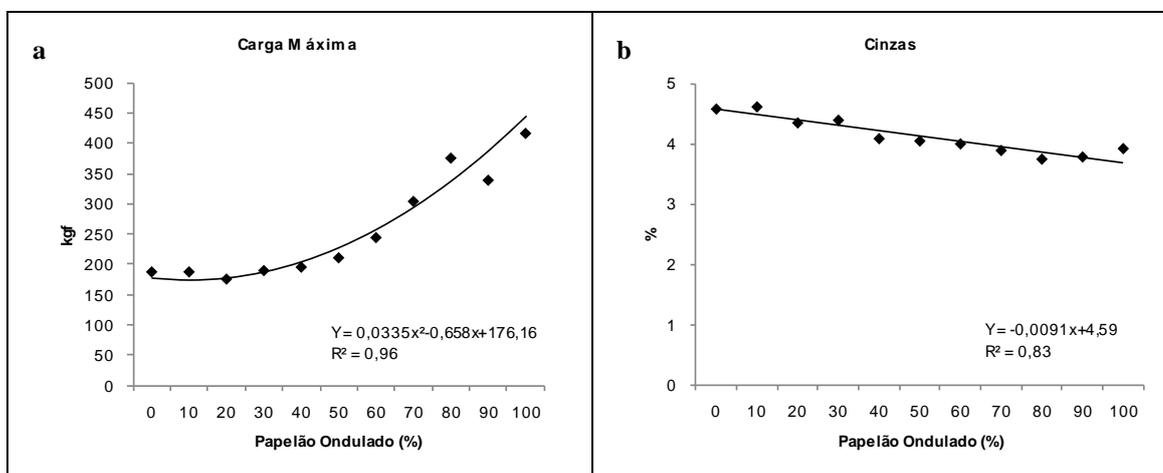


Figura 4 – Valores observados e estimados de umidade de equilíbrio higroscópico (%) e densidade (g/cm^3), em função do teor de papelão ondulado presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.



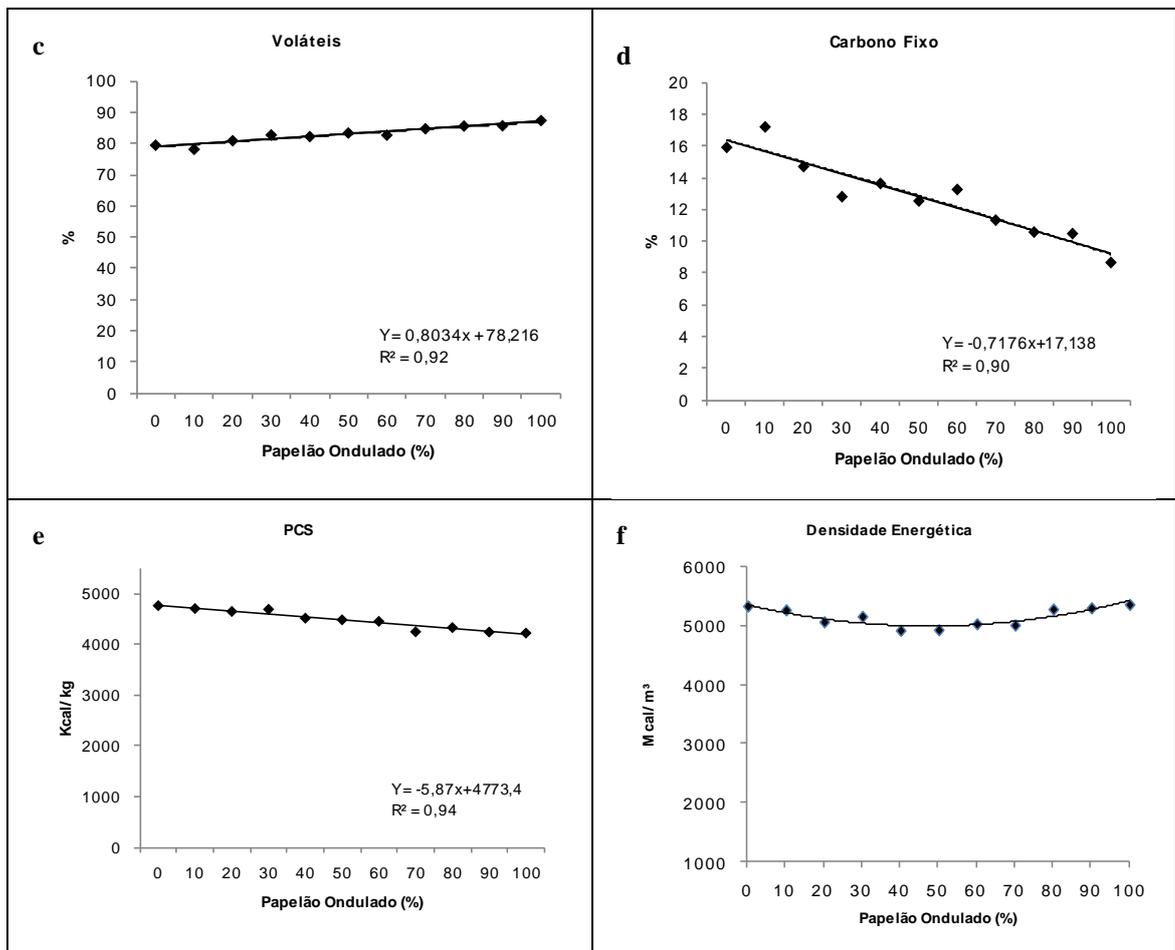


Figura 5 – Valores observados e estimados de carga máxima de ruptura (kgf), teor de cinzas (%), materiais voláteis (%), carbono fixo (%), poder calorífico superior (kcal/kg) e densidade energética (Mcal/m³) em função do teor de papelão ondulado presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

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 verificou-se 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).

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.

3.4. 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.

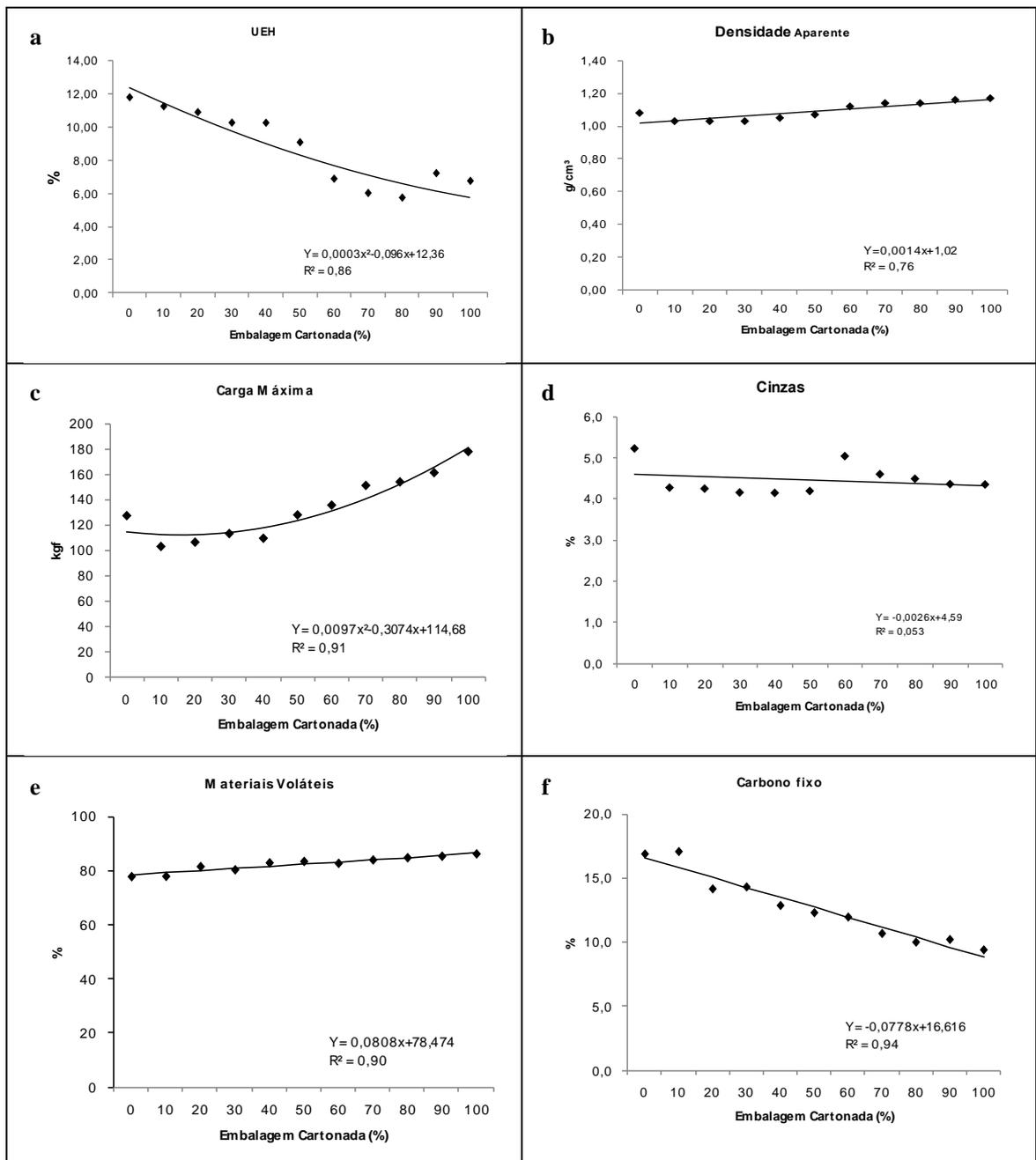


Figura 6 – Valores observados e estimados de densidade (g/cm^3), carga máxima de ruptura (kgf), umidade de equilíbrio higroscópico (%) e percentual de cinzas (%), materiais voláteis (%) e carbono fixo (%) em função do teor de embalagens cartonadas presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

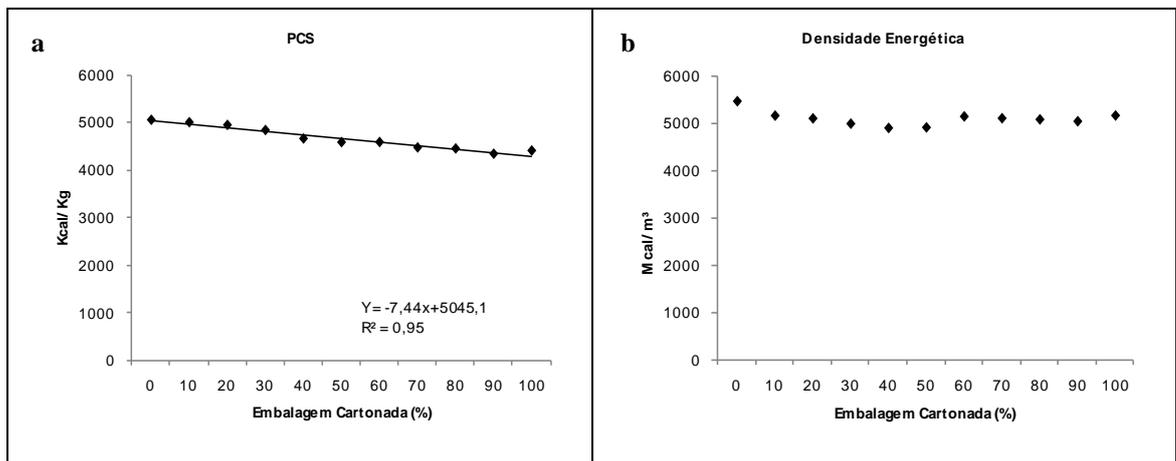


Figura 7 – Valores observados e estimados de poder calorífico superior (kcal/kg) e densidade energética (Mcal/m³) em função do teor de embalagens cartonadas presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

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.

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 a 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 g/cm³, 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 a 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 a 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 aqueles provenientes das misturas com 5, 10 e 15% de RRSU.

4. 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.

5. CONSIDERAÇÕES

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.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6922 – Carvão vegetal - Ensaios físicos determinação da massa específica (densidade a granel)**. Rio de Janeiro, 1981.

_____**NBR 7993 – Determinação da umidade da madeira por secagem em estufa quando reduzida à serragem**. Rio de Janeiro, 1983.

_____**NBR 8112 – Análise química imediata do carvão vegetal**. Rio de Janeiro, 1981.

_____**NBR 8633 – Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1986.

_____**NBR 10004 – Resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro, 2004a.

BIDONE, F.R.A. & POVINELLI, J (1999) Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. São Carlos, EESC/USP – Projeto REENGE, 120 p.

BRASIL. **Lei nº12.305**, Brasília, Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em:18/12/2013. 2010.

CAIRES, R.R. **Briquetagem – Biomassa**. Campinas. 2010. 8p. Disponível em:<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA-X4AF/briquetagem-biomassa>>. Acesso em 15/06/13.

CEMPRE. Papel ondulado, 2011. Disponível em: http://www.cempre.org.br/ft_papel_ondulado.php. Acesso em: 14 Abril. 2013.

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

CERQUEIRA, M.H., **Placas e telhas produzidas a partir da reciclagem do polietileno/alumínio presentes nas embalagens Tetra Pak**. Disponível em:<<http://www.afcal.pt/destinoFinal/PlacasTelhas.pdf>>. Acesso em: 15/06/2013.

CORTEZ, C. L.; COELHO S. T.; GRISOLI, R.; GRAVIOLI F. **Compostagem de resíduos de poda urbana**. Disponível em: http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnica_ix.pdf. Acesso: 15 de maio 2011.

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, v 30, n.62. p.101-106. 2010. Colombo – PR.

GENTIL, L.V.B. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. Brasília, 2008. 195 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Florestal). Publicação EFL TD – 009/2008. Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília.

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. V. 13, n.5, p. 657-661. 2009 Campina Grande, PB.

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

KARAMAZOVI. **Processo de briquetagem.** Disponível em: <<http://www.karamazovi.com.br/briquetes.html#briquetagem>>. Acesso em 15 de jan. 2014.

PAULA, L.E. e R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.** 2010. Dissertação (Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras. Lavras. 83f. 2010.

REALI, M.A.P., Processos físico- químicos associados a processos biológicos para o tratamento de esgoto sanitário. **Anais do I Simpósio da Engenharia Ambiental** Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, 2004. 129p. pag 14-37.

RODRIGUES, V.A.J., **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem.** 2010. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2010.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira.** Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 21 p., 1984

CAPÍTULO III

PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PELLETS COMPOSTOS POR DIFERENTES PROPORÇÕES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

RESUMO –O presente trabalho teve como objetivo principal a produção e a avaliação de pellets produzidos com misturas de resíduos sólidos urbanos bem como classifica-los conforme normas europeias de comercialização. Os pellets foram produzidos em uma peletizadora laboratorial com capacidade para produção de 50kg/h. Foram utilizadas misturas de resíduos de poda de árvores , papelão ondulado, embalagens cartonadas e lodo de flotação. Foram feitos três experimentos distintos, sendo: 1)misturas de resíduos de poda com lodo de flotação; 2) misturas de resíduos de poda com papelão ondulado e 3) misturas de resíduos de poda com embalagens cartonadas. Foram avaliados parâmetros físicos e químicos dos pellets e comparados estatisticamente entre si e também com a norma DIN EN 14961-6 (2012) que estabelece parâmetros de comercialização para pellets compostos por misturas. Sendo assim, de acordo com os resultados obtidos pode-se concluir foi possível a peletização dos diferentes resíduos, entretanto a classificação de acordo com os padrões da norma européia não se apresentou satisfatória. A peletização de resíduos de poda urbana agregando papelão ondulado ou embalagens cartonadas em diferentes proporções não foi considerada adequada visto a má compactação e agregação dos materiais. Para os pellets produzidos com misturas de resíduos de poda urbana e lodo de flotação, a adição de lodo favoreceu a baixa a umidade, a pouca geração de finos e o aumento da durabilidade e dureza embora tenha ocorrido perdas no poder calorífico.

Palavras-Chave: energia da biomassa, resíduos sólidos urbanos, pellets, normas para comercialização

1. INTRODUÇÃO

Dentre os principais fatores limitantes da utilização de biomassa para produção de calor e energia destaca-se a baixa densidade a granel, resultando em ineficiência para o manuseio e transporte. A distância entre os locais de produção/coleta da biomassa e as áreas onde a energia é demandada são consideravelmente grandes, causando significativas implicações econômicas no transporte e na estocagem do material (RENTIZELAS et al., 2009). Os processos de compactação de biomassa, em especial a peletização, são notadamente uma solução viável para o aumento da densidade do combustível, que pode ser de até 700 Kg/m³ de acordo com Sokhansanj e Turhollow (2004).

O processo de peletização é composto por várias etapas que incluem o pré-tratamento da matéria prima, a peletização e o pós-tratamento (STELTE, et al.; 2012). As etapas de pré-tratamento são relacionadas com as características do material e consiste basicamente em processos de moagem, secagem e condicionamento. Após a peletização, os pellets são resfriados e peneirados para a retirada de partículas finas.

Pellets possuem baixa umidade, o que garante condições seguras de estocagem, e a densidade sendo maior que 600 kg/m³ proporciona eficiência no transporte e armazenamento. Além disso, devido as suas dimensões, os pellets podem ser manuseados, transportados e abastecidos em caldeiras e fornos com grande facilidade. O processo de transformação da biomassa em pellets depende basicamente das propriedades físicas das partículas e das variáveis do processo, como a pressão e a temperatura (MANI, et al.,2006).

Atualmente, a madeira é a matéria prima mais utilizada para a produção de pellets principalmente por apresentar porcentagem e características das cinzas favoráveis para este uso. Apesar disso, devido a limitada fonte de madeira e a crescente demanda mundial por pellets, materiais alternativos estão sendo constantemente estudados para a produção de pellets . Stelte et al. (2012) listou os principais estudos

envolvendo novos materiais e dentre eles destacou principalmente o uso de bagaço de cana, resíduos de algodão, resíduos do processamento da azeitona e mistura de resíduos urbanos.

Stahl e Berghel (2011) citaram que atualmente na Europa muitas residências converteram o sistema de aquecimento a base de óleo para pellets de madeira e detalha que com o aumento da demanda por esse tipo de combustível, a oferta de madeira se tornará insuficiente e, portanto o uso de outras matérias prima como resíduos sólidos e misturas é uma tendência atual do mercado. Martinsson (2003) concluiu que os pellets produzidos com variados tipos de materiais possuem a mesma qualidade dos produzidos com madeira limpa, exceto por apresentarem o teor de cinzas mais elevado. O autor ainda citou que nessa nova busca por matéria prima, ainda haverá o uso de culturas agrícolas e resíduos de lignina, que poderão ser usados isoladamente ou com misturas com resíduos de madeira.

É valido ressaltar que, permeando o uso de diferentes materiais na produção de pellets deverão estar relacionadas algumas propriedades importantes, como por exemplo, alto poder calorífico, baixo teor de cinzas e baixa geração de finos (STAHL e BERGHEL, 2011). Rhén (2005) afirmou que as propriedades mecânicas dos pellets bem como a densidade, a resistência e a capacidade de absorção de água são parâmetros fortemente influenciados pela umidade dos pellets e pelos parâmetros do processo de fabricação como a pressão e a temperatura.

Características como porcentagem de finos, durabilidade mecânica e densidade a granel são importantes parâmetros de qualidade para pellets. Alta durabilidade mecânica é necessária para reduzir a presença de finos a fim de manter a boa qualidade durante o transporte, grande quantidade de finos podem causar problemas durante a estocagem e o processo de combustão além de perigos relacionados com a saúde de operários e riscos de explosão (FILBAKK et.al., 2011).

A durabilidade pode ser comparada com a força de ligação entre as partículas do material que compõe o pellet, a grande maioria dos pellets produzidos atualmente não possuem aditivos ou agentes ligantes em sua composição. Há varias teorias sobre os mecanismos de ligação entre as partículas em pellets de madeira, certamente, os componentes químicos da madeira, lignina e extrativos, são agentes fundamentais para a aglutinação natural das partículas durante a prensagem, sendo que a concentração desses componentes na madeira depende, dentre outros fatores, da espécie e da idade da árvore. O comportamento da lignina e dos extrativos são fortemente influenciados pela umidade e pela temperatura do processo, além disso, há estudos que sugerem que o pré-

tratamento da matéria prima e as condições de estocagem e do processo de peletização podem influenciar nesse processo de ligação entre partículas (JIRJIS et.al., 2006).

No Brasil, há pouca literatura referente a produção de pellets e o estabelecimento de parâmetros de qualidade. Apesar de amplamente utilizados em outros países, os pellets ainda são desconhecidos no mercado nacional e, tendo esse material como um novo insumo energético, os centros de pesquisa e universidades deverão voltar suas atividades para o estudo desse combustível de modo a estabelecer parâmetros de processo e de produto incentivando a utilização destes como fonte de energia.

Desta forma, este trabalho teve por objetivo principal a produção e a avaliação da de pellets produzidos com misturas de resíduos sólidos urbanos bem como classifica-los conforme normas europeias de comercialização.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

As matérias primas utilizadas para a produção dos pellets foram os 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 atividade 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.* and *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 material 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 águasdo 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 ao ar, 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 pellets 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.

Foi feita uma análise preliminar nos resíduos para sua inicial caracterização, cujas informações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1–Características 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)	5059,91	4220,19	4412,27	1338

2.2.Produção dos pellets

Os pellets foram produzidos em uma prensa peletizadora laboratorial da marca Amandus Kahl, modelo 14-175 com capacidade para produção de 50 kg.h⁻¹ (Figura 1), sendo produzido aproximadamente 3,0 kg de *pellets* por tratamento.

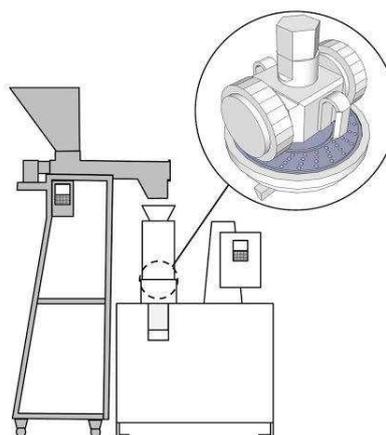


Figura 1– Prensa Peletizadora utilizada para produção dos pellets

A temperatura média de peletização foi de 95°C. Para atingir essa temperatura em menor tempo, a matriz de peletização foi pré-aquecida em óleo vegetal a 200°C por

aproximadamente 30 minutos para posterior montagem na prensa, minimizando o gasto de partículas de material para o aquecimento prévio.

Para alimentação da peletizadora, utilizou-se um sistema composto por um motor elétrico, um controlador de velocidade e uma rosca sem fim. A velocidade de alimentação variou conforme a rotação dos rolos da prensa. Após atingir a temperatura de trabalho (95°C) foi estabelecida uma velocidade média dos rolos de 1500 rpm. Os pellets foram produzidos em três experimentos distintos em função do tipo de resíduo, de acordo com a Figura 2.

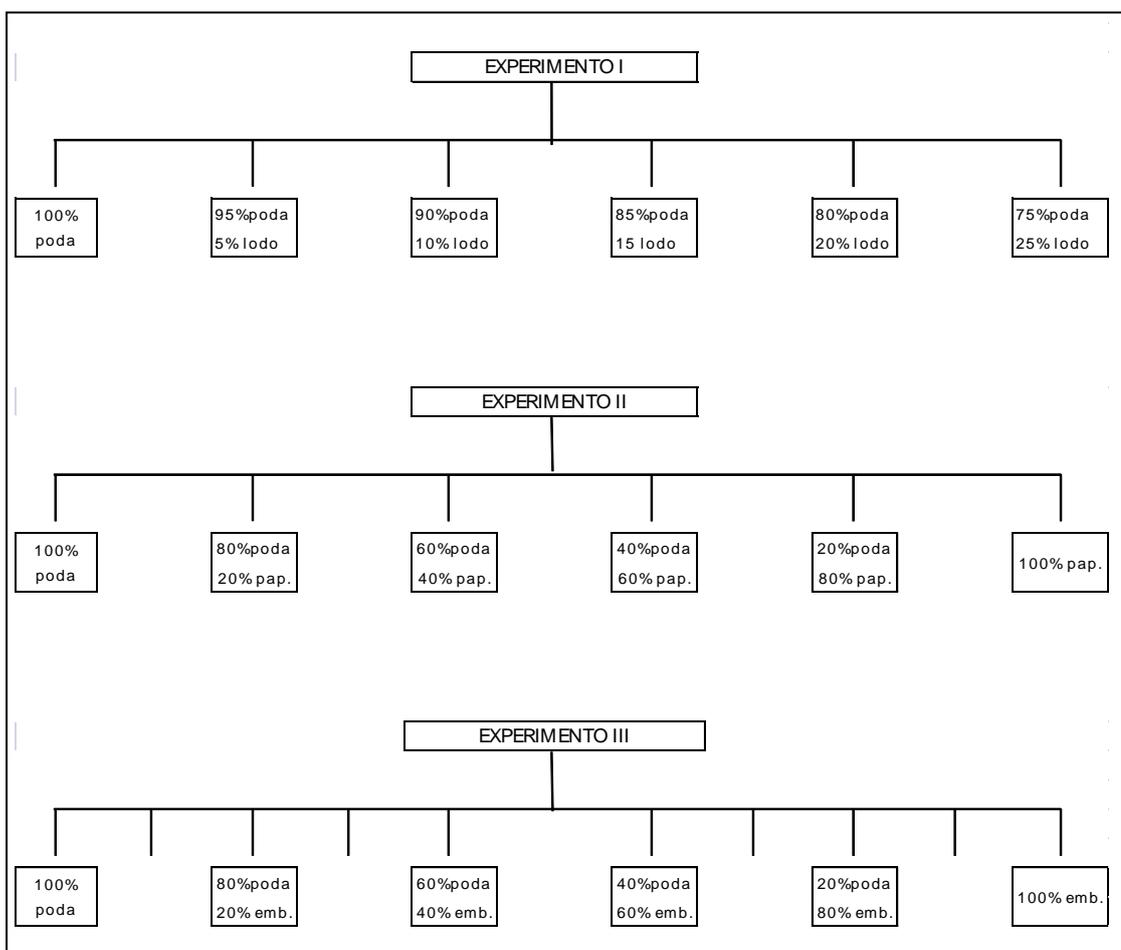


Figura 2 - Delineamento experimental utilizado para a produção dos pellets a partir dos diferentes resíduos sólidos urbanos.

2.3. Propriedades físicas, químicas e mecânicas

O diâmetro (mm) e comprimento (mm) foram obtidos seguindo a norma EN 16127 (DIN, 2010).

Para determinação da umidade de equilíbrio higroscópico, os pellets foram levados a uma câmara climática a temperatura de 20 °C e 65 % de umidade relativa, obtendo a massa final de equilíbrio. Posteriormente foi obtida a umidade de acordo com a norma EN 14774-2 (DIN, 2010).

A densidade a granel foi determinada utilizando-se um recipiente de volume conhecido, que foi cheio completamente com o material em sua umidade de equilíbrio. A massa de material necessária para completar o recipiente foi mensurada e obteve-se a densidade dividindo-se o volume do recipiente pela massa de material utilizada. Foram feitas três repetições para cada diferente pellet.

A durabilidade e a porcentagem de finos dos pellets foram determinadas utilizando o equipamento Ligno-Tester, de acordo com a norma EN- 15210-1 (DIN, 2010).

A determinação da dureza (kg) foi feita em um Durômetro para pellets da marca Amandus Kahl, onde, cada pellet foi testado isoladamente, de acordo com as orientações do fabricante.

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 obtida através da multiplicação do poder calorífico útil pela densidade a granel dos pellets, sendo apresentada em MJ/m³.

Classificação dos pellets: O principal mercado consumidor de pellets está localizado na Europa, sendo assim importante classificá-los de acordo com as normas internacionais definidas pelos países consumidores. A norma Alemã DIN EN 14961-6 (2012) trata da qualidade de pellets de madeira para uso não industrial e será utilizada para fins de comparação da qualidade dos pellets produzidos neste trabalho, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades exigidas pela norma DIN EN 14961-6

Parâmetro	Qualidade	
	A	B
Origem	Biomassa herbácea	
	Biomassa frutífera	
	Misturas	
Diâmetro (D) e Comprimento (C) (mm)	D06 a D25 ± 1;	
	D06 a D10 13,15 ≤ C ≤ 40	
	D12 a D25 13,15 ≤ C ≤ 50	

Umidade (% base seca)	$\leq 13,6$	$\leq 17,6$
Teor de cinzas (% base seca)	≤ 5	≤ 10
Durabilidade mecânica (%)	$\geq 97,5$	$\geq 96,0$
Finos (%)	$\leq 2,0$	$\leq 3,0$
Poder Calorífico (kcal/kg)	≥ 3.367	≥ 3.152
Densidade a granel (kg/m ³)	≥ 600	≥ 600

Fonte: Adaptado de DIN EN 14961-6 (2012)

2.4. Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes Cochran e Lilliefors para avaliar a homogeneidade e normalidade das variâncias. Posteriormente procedeu-se a análise de variância pelo teste F e quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de skott-knot a 95% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Pellets produzidos com resíduos de poda urbana e lodo de flotação

Os pellets produzidos com misturas de resíduos de poda urbana e lodo de flotação apresentaram aspecto visual satisfatório, tendo boa uniformidade, ausência de fissuras e trincas, superfície lisa e brilhante indicando que houve suficiente plasticização da lignina, conforme pode ser observado na Figura 3.



Figura 3 – Pellets produzidos com diferentes misturas de resíduos de poda urbana e lodo de flotação.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios para as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos pellets produzidos com resíduos de poda urbana e lodo de flotação. Os valores destacados em negrito se referem àqueles tratamentos que não atingiram os valores mínimos para determinada característica estabelecidos pela norma de classificação DIN EN 14961-6 (2012).

Tabela 3– Propriedades dos pellets produzidos com resíduos de poda urbana e lodo de flotação.

% Lodo	D (mm)	C (mm)	U (% bs)	DG (kg/m ³)	DZ (kg)	F (%)	DU (%)	Cz (%)	PCS (kcal/Kg)
0	5,91 b	19,7 a	5,0 b	700 b	42 a	1,4 a	87,8 b	3,51 f	4592 a
5	6,14 a	18,8 a	6,3 a	680 b	40 a	0,4 b	94,8 a	6,26 e	4509 b
10	6,11 a	19,7 a	5,8 a	700 b	35 a	0,2 b	93,2 a	8,42 d	4354 c
15	6,10 a	19,1 a	5,0 b	720 a	31 a	0,2 b	94,0 a	12,91 c	4219 d
20	6,06 a	19,3 a	5,1 b	730 a	41 a	0,1 b	87,0 b	16,64 b	3962 e
25	6,09 a	19,4 a	5,4 b	730 a	37 a	0,0 b	95,5 a	20,23 a	3783 f

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Skott-Knott, a 5% de significância.

D = diâmetro; C = comprimento; U = umidade; DG = densidade à granel; DZ = dureza; F= finos; DU = durabilidade; Cz = cinzas; PCS = poder calorífico superior

As dimensões (diâmetro e comprimento) de todos os pellets produzidos atenderam as especificações da norma, com diâmetro variando de 5,91 a 6,14 mm e 18,8 a 19,7 mm, respectivamente.

Tanto o comprimento quanto a dureza não apresentaram diferenças estatisticamente significativas de acordo com a porcentagem de lodo adicionado aos pellets. Para o diâmetro apenas os pellets compostos por 100% de resíduos de poda urbana apresentaram média inferior às demais, fato que pode ser explicado devido a maior compactação ocorrida no material composto apenas por madeira e por possuir menor densidade a granel em relação ao lodo.

A umidade foi semelhante para os pellets compostos por 5 e 10% de lodo, sendo que essas médias foram superiores às dos demais tratamentos. Embora tenha havido essa diferenciação todos os valores são relativamente baixos e considerados ótimos para a utilização como biocombustíveis.

Com relação à geração de finos, os pellets com misturas de lodo apresentaram médias inferiores aos compostos apenas por poda urbana, indicando que a adição de lodo pode ter proporcionado maior resistência e maior ligação entre as partículas, favorecendo dessa forma as atividades de manuseio, transporte e estocagem.

Já para a durabilidade, as porcentagens de 0 e 20% de lodo apresentaram médias menores que as demais e semelhantes entre si. O resultado para os pellets produzidos apenas com poda era esperado, visto que a adição de lodo, de forma geral, tem proporcionado resistência aos pellets, e para os produzidos com 20% de lodo, o baixo valor pode ter ocorrido devido a insuficiente agregação entre as partículas que possuem características distintas.

A durabilidade mecânica é um parâmetro de qualidade que pode ser definido como a capacidade que os combustíveis densificados apresentam de permanecerem intactos durante o manuseio, evitando a produção de partículas finas e sujeira, que podem levar a problemas nas caldeiras e combustão heterogênea.(Temmerman et al,2006).. Sendo assim, de acordo com a norma DIN em questão neste trabalho, a durabilidade obtida para todos as misturas de resíduos de poda e lodo não atendeu aos valores mínimos de qualidade, embora alguns tenham se apresentados próximos ao mínimo ideal que é de 96%. Para que esta característica seja melhorada, sugere-se intervir na umidade da matéria-prima e também nas condições de peletização, principalmente temperatura, que são fatores primordiais para uma adequada compactação e ligação entre os materiais.

Um fator que pode ser considerado o mais importante para a qualidade dos pellets no que diz respeito à durabilidade mecânica é a umidade da matéria prima que foi utilizada para sua fabricação. A umidade das partículas age como um agente ligante entre elas, afetando as características mecânicas como durabilidade e teor de finos, além disso a umidade também pode funcionar como um lubrificante que minimiza o atrito dentro da prensa resultado em menor consumo de energia no processo (Kaliyan and Morey, 2009, tese).

Importantes também são os valores de cinzas e poder calorífico que foram estatisticamente diferentes para todas as porcentagens de lodo. A adição de lodo favoreceu o aumento do teor de cinzas e conseqüentemente a diminuição do poder calorífico dos combustíveis sólidos. Além disso, acima de 10% de lodo, os teores de cinzas já não são mais aceitos para utilização pela norma DIN, apresentado valores de até 2 vezes mais que o estabelecido.

Levando-se em consideração que o poder calorífico dos combustíveis influenciam fortemente no modelo e no controle da câmara de combustão (Erol, et al., 2010) e sob o ponto da diferença estatística apresentada entre os tratamentos, a mistura de resíduos de poda e lodo de flotação carece de rigoroso controle caso este combustível seja utilizado como fonte de energia.

Observa-se, de modo geral, tendências distintas conforme a proporção de lodo adicionada aos pellets. O caráter inorgânico e hidrofóbico do lodo de flotação proporcionou uma diminuição da umidade conforme o aumento da proporção deste; a porcentagem de finos e o poder calorífico também seguiram esta mesma relação. A densidade a granel e a durabilidade foram favorecidas pela adição de lodo e o teor de cinzas aumentou conforme o acréscimo de lodo.

É importante ressaltar que a adição de lodo de flotação em combustíveis sólidos pode proporcionar resultados diversos. Em se tratando de resistência, durabilidade, baixo conteúdo de água e baixa geração de finos, o lodo mostrou-se um excelente material aditivo, porém, esses benefícios são confrontados quando ocorre a diminuição do poder calorífico e o aumento do teor de cinzas.

O ponto principal que deve ser considerado é a relação desses parâmetros para que seja possível a obtenção de um combustível sólido com características físicas e químicas que favorecem a utilização e ao mesmo tempo, que viabilizem a geração de energia de forma eficiente/suficiente e sem grandes custos relacionado com a remoção/disposição das cinzas e manutenção de equipamentos utilizados para a combustão.

3.2. Pellets produzidos com resíduos de poda urbana e papelão ondulado

Durante a produção, observou-se que à medida que a porcentagem de papelão foi aumentada, houve uma queda na qualidade física dos pellets, tornando-os mais quebradiços e menos compactados. Por causa disso, o tratamento com 100% papelão ondulado não foi possível de ser realizado, principalmente devido à baixa densidade desse material e a tendência de formação de aglomerados na matriz da peletizadora. Durante o processo, a alimentação da prensa foi difícil, pois o material agarrava na alça dos rolos e conseqüentemente não alcançava a matriz para compactação. Na Figura 4 são mostrados os pellets produzidos com misturas de resíduos de poda urbana e papelão ondulado.



Figura 4 – Pellets produzidos com diferentes misturas de poda urbana e papelão ondulado

Na Tabela 3 são apresentados os valores das propriedades determinadas para os pellets produzidos com resíduos de poda urbana e papelão ondulado. Os valores destacados em negrito se referem àqueles tratamentos que não atingiram os valores

mínimos para determinada característica estabelecidos pela norma de classificação DIN EN 14961-6 (2012).

Tabela 3 – Propriedades dos pellets produzidos com resíduos de poda urbana e papelão ondulado

% Papelão	D (mm)	C (mm)	U (% bs)	DG (kg/m ³)	DZ (kg)	F (%)	DU (%)	Cz (%)	PCS (kcal/Kg)
0	5,99 d	20,3 a	4,2 d	710 a	39 a	1,4 b	92,2 a	3,22 b	4592 a
20	6,06 b	19,2 a	5,9 c	670 b	31 a	0,5 b	90,7 a	2,90 b	4476 a
40	6,10 a	19,2 a	6,1 c	650 c	40 a	0,9 b	90,5 a	3,60 a	4410 a
60	6,12 a	19,8 a	7,7 a	680 b	29 a	0,5 b	86,1 b	3,73 a	4406 a
80	6,03 c	17,7 b	6,8 b	640 c	16 b	12,3 a	72,9 c	3,72 a	4302 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Skott-Knott, a 5% de significância.

D = diâmetro; C = comprimento; U = umidade; DG = densidade à granel; DZ = dureza; F= finos; DU = durabilidade; Cz = cinzas; PCS = poder calorífico superior

Nas proporções de 40 e 60% de papelão foram observados os maiores diâmetros, podendo estar relacionado com a baixa aderência entre as partículas de papelão e poda; para o comprimento a menor média foi obtida na porcentagem de 80% principalmente devido à má compactação; para essas duas características os pellets compostos por 100% de resíduos de poda urbana obtiveram boa conformação e manutenção da estrutura após o processo.

Filbakk et.al. (2011), estudando como a adição de casca de madeira afeta na qualidade dos pellets, identificou que pellets produzidos com 100% de casca possuíam melhores propriedades mecânicas comparado com pellets produzidos com misturas de casca e madeira, fato que foi explicado pela diferença estrutural dos dois materiais afetando os mecanismos de compactação entre as partículas. A casca apresenta maiores concentrações de lignina e extrativos que a madeira e de acordo com Lehtikangas (2001) altas concentrações de lignina e extrativos afetam positivamente os mecanismos de ligação durante o processo de peletização. Este fato pode correlacionar-se com a composição dos resíduos de poda, pois estes apresentam em sua composição folhas e cascas que favorecem o aumento da porcentagem de extrativos e lignina presentes na mistura e por conseguinte as propriedades físicas.

Com relação à umidade, a maior média foi obtida para o tratamento de 60% seguido pelo de 80%, fato indicativo de que a mistura de materiais pode ter contribuído para a compactação ineficiente e o aparecimento de fissuras as quais podem ser pontos de absorção de umidade, para esse parâmetro os pellets produzidos com 100% de poda

tiveram a menor média, ponto favoráveis para a eficiência energética durante o processo de combustão.

Alguns estudos sobre a estrutura geométrica das partículas devem ser feitos no intuito de gerar indicações sobre a melhor distribuição granulométrica das partículas para que poça favorecer a ligação entre os materiais. Ressalta-se também que devido a heterogeneidade dos materiais pode haver secagem desigual e o surgimento de rachaduras que por sua vez favorecerão a perda de resistência (LEHTIKANGAS, 2001).

É importante observar também que a maior geração de finos e a menor durabilidade foi obtida para as proporções de 60 e 80% de papelão ondulado, bem como a menor dureza e a mais baixa densidade a granel. Essas constatações podem estar relacionadas principalmente com a baixa densidade dos resíduos de papelão ondulado e as dificuldades encontradas para a mistura e compactação durante o processo.

A distribuição granulométrica é também um parâmetro muito importante a ser determinado nos materiais para serem compactados. Para a peletização, geralmente assume-se que partículas pequenas (com alta área superficial) aumentam a densidade e a dureza dos PELLETS (LEHTIKANGAS, 2001; MANI ET AL., 2006; KALIYAN AND MOREY, 2009). Também destacou-se que, uma mistura de diferentes tamanhos de partículas pode fazer com que estas fiquem com umidade diferente interferindo na correta compactação.

Para o poder calorífico, não houve efeito dos tratamentos, sendo os valores médios obtidos acima de 4.300 kcal/kg, podemos considerar satisfatórios para o uso como fonte de energia tendo em vista a umidade média dos pellets.

De maneira geral, observa-se uma tendência de diminuição de densidade, durabilidade e dureza conforme o aumento da porcentagem de papelão ondulado adicionado aos pellets, indicando que a utilização deste tipo de material pode acarretar em perdas de padrões de qualidade e de aspectos físicos, portanto devem ser estudadas porcentagens ideais para evitar essa desqualificação, além da necessidade de se promover melhoras na homogeneidade granulométrica das misturas.

Da mesma forma, é também importante considerar que, o aumento dos teores de papelão ondulado dentre os diferentes tratamentos proporcionou um aumento gradativo no teor de cinzas dos pellets, porém para esta situação, este acréscimo não foi suficiente para proporcionar redução significativa do poder calorífico.

De acordo com a norma de classificação, apenas os pellets produzidos com 80% de papelão ultrapassaram o valor adequado de porcentagem de finos. Já para durabilidade nenhum tratamento foi satisfatório, indicando novamente a necessidade de

alterações nas proporções de mistura e nas características físicas dos materiais antes da peletização.

3.3. Pellets produzidos com resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas

A produção dos pellets com misturas de poda urbana e embalagens cartonadas (Figura 5) também foi difícil principalmente pela baixa densidade das partículas de embalagens, porém foi possível a produção do tratamento de 100%, embora tenham se apresentado bastante quebradiços.

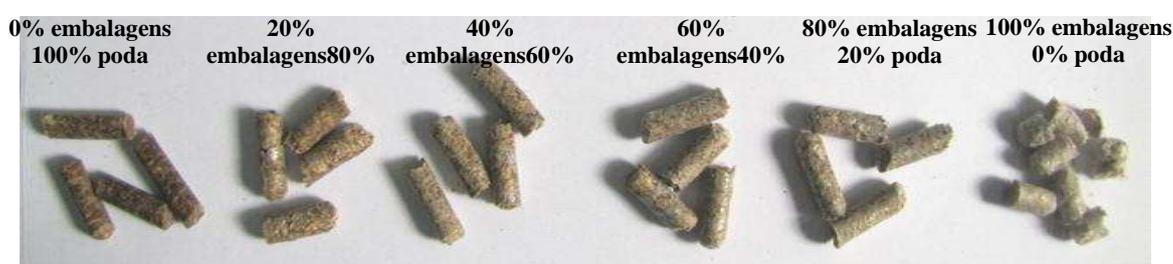


Figura 5 – Pellets produzidos com diferentes misturas de poda urbana e embalagens cartonadas

Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos pellets produzidos com resíduos de poda urbana e embalagem cartonada. Os valores destacados em negrito se referem àqueles tratamentos que não atingiram os valores mínimos para determinada característica estabelecidos pela norma de classificação DIN EN 14961-6 (2012).

Tabela 4 – Propriedades dos pellets produzidos com resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas

% Embalagens	D (mm)	C (mm)	U (% bs)	DG (kg/m ³)	DZ (kg)	F (%)	DU (%)	Cz (%)	PCS (kcal/Kg)
0	6,02 e	20,3 a	4,3 c	720 a	37 a	2,2 b	90,4 a	3,37 e	4592 b
20	6,41 a	18,1 b	8,7 a	530 b	7 b	6,4 a	49,2 d	4,88 c	4675 b
40	6,35 b	16,9 b	8,3 a	510 c	5 b	2,3 b	74,9 c	5,21 b	4806 a
60	6,26 c	16,6 b	7,8 a	470 d	6 b	1,4 b	81,3 b	5,81 a	4870 a
80	6,09 d	18,4 b	6,7 b	440 e	4 b	1,7 b	81,1 b	4,26 d	4683 b
100	6,10 d	13,2 c	3,7 c	310 f	4 b	-	-	-	-

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Skott-Knott, a 5% de significância.

D = diâmetro; C = comprimento; U = umidade; DG = densidade a granel; DZ = dureza; F= finos; DU = durabilidade; Cz = cinzas; PCS = poder calorífico superior

Podemos evidenciar que, para todos os parâmetros, houve diferenças significativas entre os tratamentos. Para o diâmetro, a maior média foi para o tratamento com 20% de embalagens cartonadas na composição e para o comprimento foi de 0%, indicando que a adição de embalagens cartonadas pode ter prejudicado a manutenção da forma dos pellets. Fato que pode ser reafirmado pela baixa densidade a granel, baixa dureza e baixa durabilidade observadas para os pellets produzidos com maiores teores de embalagens.

Houve tendências de diminuição da densidade a granel conforme o aumento da porcentagem de embalagens cartonadas, esta diminuição da densidade também pode estar atrelada à baixa dureza apresentada nos maiores teores.

De acordo com Lehtikangas (2001) nenhuma correlação foi encontrada entre o comprimento e a densidade a granel de pellets produzidos com resíduos de madeira. Com relação ao comprimento dos pellets, Sthal (2011) também observou que a mistura de materiais favoreceu a produção de pellets de menor comprimento.

Estudos sobre misturas de serragem de madeira e resíduos da extração de óleo de canola para a produção de pellets constataram um decréscimo da durabilidade mecânica com o aumento da porcentagem de resíduos de canola na constituição dos pellets. O autor aponta que os resíduos da extração do óleo podem ter interferido nos mecanismos de aderência das partículas de madeira e que os extrativos presentes no óleo parecem não exercer função de agente ligante. Para esse estudo a densidade a granel também foi diminuída pela presença de outros materiais a não ser a madeira (STHAL, 2011).

Os parâmetros do processo podem interferir nas propriedades dos pellets, Mani et al. (2006) ressaltou que a densidade é fortemente afetada pela força de compressão, tamanho da partícula e conteúdo de água, sendo que geralmente, o aumento da umidade nos pellets proporciona o decréscimo da densidade. Fato esse também observado nos pellets produzidos nesse estudo.

Nessas condições a adição de vapor d'água durante o processo de peletização pode ser uma técnica que favoreça a compactação dos pellets, pois, a umidade juntamente com a temperatura tornará a matéria prima mais flexível e por sua vez melhorando as ligações internas (LARSSON, 2008; PAULRUD, 2004 e RHEN, 2005).

Outro fato importante é que a tendência observada para o teor de cinzas é de aumento com a adição de embalagens, da mesma forma ocorre para o poder calorífico. Possivelmente devido a presença de polietileno e alumínio na composição, as embalagens favorecem o aumento do poder calorífico porém geram mais compostos inorgânicos que são refletidos no teor de cinzas.

Na medida em que a adição de diferentes resíduos em pellets de madeira favoreceu a diminuição de durabilidade, algumas precauções com relação ao uso doméstico desses pellets devem ser tomadas. Obernberger e Thek (2004) sugeriram que misturas de materiais devem ser evitadas caso se tenha como objetivo o uso para calefação doméstica, ou em plantas de geração de energia de pequeno porte, basicamente porque os pequenos consumidores possuem sistemas simples de conversão, sem controle de processo ou acompanhamento profissional. Isso quer dizer que os pequenos consumidores não são tão tolerantes a diferenças de qualidade dos pellets como os consumidores em grande escala.

Em estudo realizado por Holt et.al. (2006) foram avaliadas as características de 7 diferentes pellets compostos por diferentes misturas de resíduos de madeira. A densidade a granel variou entre 488,1 a 677,8 kg/m³ para os pellets compostos por misturas e 655,7 kg/m³ para os apenas de resíduos de madeira. O poder calorífico superior esteve compreendido entre 17,90 a 20,93 MJ/kg para todos os tratamentos e o teor de cinzas entre 4,88 e 9,75 % para as misturas e de 0,49 % para os pellets de madeira, valores estes semelhantes aos determinados para os pellets produzidos com resíduos de poda, lodo, papelão e embalagens.

De acordo com a literatura citada acima pode-se discutir que os pellets produzidos a partir de misturas de resíduos de poda urbana, papelão ondulado e embalagens cartonadas apresentaram variações nos parâmetros de qualidade semelhantes aos produzidos com diversos outros tipos de resíduos em outros estudos. De forma geral, a mistura de outros materiais com resíduos de madeira podem proporcionar a perda de qualidade principalmente no parâmetros de resistência e durabilidade.

Apesar disso, a adição de lodo de flotação aos resíduos de poda urbana proporcionou ganhos na resistência e na durabilidade dos pellets. A desvantagem da utilização desse material como aditivo aos pellets é a perda em poder calorífico e a alta geração de cinzas, situações de devem ser controladas visando a otimização dos processos e da utilização.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir:

- A produção de pellets compostos por resíduos de poda urbana e lodo de flotação, em diferentes proporções foi tecnicamente possível.
- A peletização de resíduos de poda urbana agregando papelão ondulado ou embalagens cartonadas em diferentes proporções não foi considerada satisfatória.
- Os pellets produzidos com misturas de resíduos de poda urbana e lodo de flotação, a adição de lodo favoreceu a diminuição da umidade e da geração de finos, e o aumento da durabilidade e dureza. O poder calorífico foi reduzido e o teor de cinzas elevado com a adição de lodo.
- A adição de papelão ondulado em pellets compostos por resíduos de poda urbana acarretou a diminuição da densidade, durabilidade e dureza. Essa adição também ocasionou a elevação dos teores de cinzas, porém sem interferência no poder calorífico.
- As misturas com embalagens cartonadas favoreceram a diminuição da densidade a granel dos pellets, bem como da densidade, durabilidade e dureza. A adição de embalagens também proporcionou um discreto aumento nos teores de cinzas, porém o poder calorífico também foi levemente aumentado.

- De modo geral, foi possível a peletização dos diferentes resíduos, conforme pode ser observados nos resultados apresentados. No entanto, a classificação de acordo com os padrões da norma europeia DINEN 14961-6 (2012), não foi satisfatória, devido à problemas de compactação e características físicas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 8633** – Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1986

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14775: Determination of ash content**. Berlim: CEN, 2009. 12 p

_____. **DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method**. Berlim: CEN, 2010. 10 p.

_____. **DIN EN 14961-6: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Non-woody pellets for non-industrial use**. Berlim: CEN, 2012. 16 p.

_____. **DIN EN 15210-1: Determination of mechanical durability of pellets and briquettes. Part 1: pellets**. Berlim: CEN, 2012. 11 p. EN, 2009: Solid biofuels.

_____. **DIN EN 16127: Determination of length and diameter of pellets**. Berlim: CEN, 2012. 11 p.

EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KÜÇÜKBAYRAK, S.. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. **Renewable Energy**, v.35, n.1, p. 170-173. 2010

FILBAKK, T.; JIRJIS, R.; NURMI, J.; HOIBO, O. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p. 3342-3349, 2011.

HOLT, G.A.; BLODGETT, T.L.; NAKAYAMA, F.S. Physical and combustion characteristics of pellets fuel from cotton gin by-products produced by select processing treatments. **Industrial Crops and Products** v. 24, p. 204-13, 2006.

JIRJIS, R. ÖHMAN, M; VINTERBÄCK, J. **Pellets quality effects of raw material properties and manufacturing process parameters**. Uppsala, Sweden Department of Bioenergy, 2006.

- KALIYAN N.; MOREY, RV. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v.33, n. 3, p. 337-359, 2009.
- LARSSON, S.H; THYREL, M; GELADI, P.; LESTANDER, TA. High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. **Bioresource Tech**;99(15): 7176-82.2008
- LEHTIKANGAS, P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. **Biomass Bioenergy**, v.20, p. 351-360, 2001.
- MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**, v.30, p.648-654, 2006.
- MARTINSSON, L. **Materials in Sweden for future production of fuel pellets. – A review of possible materials in short –and medium long-term.** Stockholm, Sweden: Värmeforsk; 2003 Report 813 (In Swedish. Summary in English).
- OBERNBERGER, I; THEK, G. Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass Bioenergy**, v.27, p. 653-669, 2004.
- PAULRUD, S. Upgraded biofuels – effects of quality on processing, handling characteristics, combustion and ash melting, in unit of biomass technology and chemistry. **Acta Universitatis Agriculturae Sueciae**, n.449, 2004.
- RHEN, C; GREF, R; SJOSTROM, M; WASTERLUND, I. Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. **Fuel Process Tech**, v.87, n.1, p. 11-16, 2005.
- Rentizelas, A.; Karellas, S.; E., Tatsiopoulou, I. Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications. **Biomass and Bioenergy**, v.50, p. 674-681, 2009.
- STAHL, M; BERGHEL, J. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust rapeseed cake. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 4849-54, 2011.
- SOKHANSANJ, S.; AND A. F. TURHOLLOW. Biomass densification – cubing operations and costs for corn stover. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n.4, p. 495-499, 2004.
- STELTE, W.; HOLM, JK.; SANADI, AR.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN UB. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 2, p. 910-918, 2011.
- TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; JENSEN, P.D.; HARTMANN, H.; BÖHM, T. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. **Biomass Bioenergy**, v. 30, n.1, p 964–972, 2006.

CONCLUSÕES GERAIS

- Os resultados do Capítulo I permitem concluir que os dentre os resíduos analisados, não foram determinadas características favoráveis para o uso do lodo de flotação como insumo energético, basicamente pelo seu alto teor de cinzas e baixo poder calorífico. Os resíduos de poda, papelão ondulado e embalagens cartonadas apresentaram características favoráveis para o uso energético, porém considerações sobre a densidade destes materiais bem como as implicações sobre o manuseio e transporte devem feitas.

- Os resultados obtidos n o Capítulo II permitem concluir que foi 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 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 proporcionou um aumento na densidade aparente e a resistência à compressão, e a umidade de equilíbrio higroscópico foi inversamente proporcional ao aumento desta proporção. 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.

- Os resultados obtidos no Capítulo III permitem concluir que a produção de pellets compostos por resíduos de poda urbana e lodo de flotação, em diferentes proporções foi tecnicamente possível, porém a peletização de resíduos de poda urbana agregando papelão ondulado ou embalagens cartonadas em diferentes proporções não

foi considerada satisfatória. A adição de lodo favoreceu a diminuição da umidade e da geração de finos, aumentando a durabilidade e dureza dos pellets. A adição de papelão ondulado e de embalagens cartonadas nos pellets compostos por resíduos de poda urbana acarretou a diminuição da densidade, durabilidade e dureza. Essa adição também ocasionou a elevação dos teores de cinzas, porém sem interferência no poder calorífico. De modo geral, foi possível a peletização dos diferentes resíduos, entretanto, a classificação de acordo com os padrões da norma europeia DIN EN 14961-6 (2012), não foi satisfatória, devido à problemas de compactação e características físicas.