



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

ARTHUR SANTOS MAGALHÃES

**BRIQUETES DE RESÍDUOS URBANOS: UMA ALTERNATIVA ENERGÉTICA
PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO.**

MOSSORÓ

2018

ARTHUR SANTOS MAGALHÃES

**BRIQUETES DE RESÍDUOS URBANOS: UMA ALTERNATIVA ENERGÉTICA
PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO.**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
ENGENHARIA FLORESTAL.

Orientador: Vinicius Gomes de Castro, Prof.
Dr.

MOSSORÓ

2018

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M188b MAGALHÃES, ARTHUR SANTOS.

BRIQUETES DE RESÍDUOS URBANOS: UMA ALTERNATIVA
ENERGÉTICA PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO / ARTHUR
SANTOS MAGALHÃES. - 2018.
39 f.: il.

Orientador: Dr. VINICIUS GOMES DE CASTRO. Monografia
(graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de
Engenharia Florestal, 2018.

1. Madeira. 2. Briquetes. 3. Energia. I. DE CASTRO, Dr. VINICIUS
GOMES, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ARTHUR SANTOS MAGALHÃES

**BRIQUETES DE RESÍDUOS URBANOS: UMA ALTERNATIVA ENERGÉTICA
PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO.**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
ENGENHARIA FLORESTAL.

Defendida em: 17 / 04 / 2018.

BANCA EXAMINADORA

Vinicius Gomes de Castro, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Rafael Rodolfo de Melo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Carlos José da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde, força e direcionamento, essenciais para que chegasse até aqui.

Aos meus pais Nivaldo dos Santos e Emanuel Francisco Pinto Barreto. O exemplo de luta, paciência, perseverança, dedicação e amor presentes na figura de cada um trazem a reflexão de quanto o afeto, o carinho, o amor e a educação são ferramentas transformadoras da realidade a qual estamos inseridos. Muito obrigado por tudo.

À minha mãe, Terezinha Ferreira Magalhães P. Barreto, minha guerreira. O seu amor e sua força me inspiram a ser melhor a cada dia, ensinam não abaixar a cabeça diante das lutas e não perder o foco mesmo diante das tempestades.

Ao meu irmão, André Luís Santos Magalhães. Muito obrigado! Seu cuidado, sua irmandade e sua parceria transformam a vida de quem tem o privilégio de conviver contigo. Minha vida sem você não teria a mesma cor.

À Renata Carvalho, meu coração fora do peito.

Aos amigos Cláudio Garcia, Pedro Igor, Bruno Pedrosa, Erick Andrade. Muito obrigado!

À Dona Francisca, Risonete e Soledade pela prontidão, carinho e amizade. Todos esses anos seriam muito mais difíceis sem a presença de vocês.

Aos amigos de república em todos esses anos: Armando, Silvio, Orlando, Efraim, Evilásio, Hilbaty, Acácio, aos agregados da nova 17 e aos amigos Erick Daniel, Romario Mendes, Breno Marinho e demais amigos mossoroenses e colegas de curso. A convivência com todos foi fundamental. O que levamos nessa vida são as relações que criamos e eu os levarei comigo. A cada dia um aprendizado, obrigado!

Aos amigos de Laboratório: Vitor, Tiago, Juliana, Sara. Este trabalho mostra como a união de forças nos permite superar as próprias barreiras. Obrigado!

À Lidiane, técnica do Laboratório de Tecnologia da Madeira, pela ajuda na execução das análises.

À Professora Dra. Rejane Botrel pela ajuda no início deste trabalho. Obrigado!

Às professoras Dra. Carolina Malala e Dra. Jeane Portela pela disponibilidade.

Ao professor Dr. Alan Cauê pela ajuda na aquisição de resíduos para realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Florestal da UFERSA. O convívio com vocês no decorrer desses anos nos inspira a não desistir e a enxergar que cada pedra no caminho

pode embasar o que seremos no futuro. Pelas palavras, puxões de orelha, pela paciência, pelos ensinamentos e por acreditar em nós. Agradeço de coração.

Ao professor Dr. Vinicius Gomes de Castro, pela orientação, paciência, amizade e pela presença em cada fase deste trabalho. Sua seriedade e simplicidade dizem muito do profissional que devemos ser e do comprometimento que devemos ter com as atividades que nos propomos a fazer, mostram também o quanto podemos abrir o horizonte de quem está perdido. Por tudo, agradeço de coração.

Enfim, a todos com quem convivi e que muito contribuíram nessa caminhada. Obrigado!

RESUMO

No semiárido brasileiro, a pressão sobre a vegetação nativa é um problema e a regeneração natural em áreas de caatinga é lenta, no entanto, isso não é suficiente para barrar o avanço da supressão vegetal causado pelo acréscimo na demanda energética local. Este trabalho teve como objetivo encontrar uma alternativa à exploração massiva dos recursos renováveis ao apresentar uma proposta de produção de briquetes com três tipos de resíduos sólidos para produção energética. Foram utilizados resíduos da madeira de Maçaranduba (*Manilkara* sp) oriundos da construção civil, resíduos da produção de carvão e três tipos de papel para a composição de nove tratamentos. A caracterização dos briquetes produzidos ocorreu no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Para a caracterização foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas, a química imediata, o índice de combustão e o poder calorífico. De modo geral, os nove tratamentos caracterizados se mostraram potenciais geradores de energia. Briquetes produzidos com finos de carvão, independentemente do tipo de aglomerante celulósico usado, tenderam a apresentar boas médias de poder calorífico e de índices de combustão. O uso de uma mistura de carvão e pó de madeira resultou em briquetes de maior poder calorífico.

Palavras-chave: madeira; briquetes; energia.

BRIQUETTES FROM URBAN WASTES: AN ALTERNATIVE ENERGY SOURCE FOR THE BRAZILIAN SEMIARID REGION

ABSTRACT

In the Brazilian semi-arid region, threats to native vegetation are a problem and natural regeneration is slow in caatinga areas. This is not enough, however, to prevent the advance of vegetation suppression caused by the increase in local energy demand. This work aimed at finding an alternative to the massive exploitation of renewable resources, while proposing to produce briquettes from three types of solid waste for energy production purposes. Maçaranduba wood (*Manilkara* sp), residues from the construction industry, wastes from wood charcoal production and three types of paper were used to constitute nine types of briquettes. The characterization of the briquettes took place in the Laboratory of Wood Technology at the Federal Rural University of the Semi-Arid Region. The physical and mechanical properties, immediate chemistry, combustion index and heating value were analyzed for the briquettes characterization. In general, the nine types of briquettes have shown potential as energy generators. Briquettes produced with wood charcoal fines, regardless of the type of cellulosic binder used, tended to have good averages of heating value and combustion indexes. The use of a mixture of wood charcoal and wood residues resulted in briquettes of higher heating value.

Keywords: wood, briquettes, energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Prensa de Peterson.	16
Figura 2	– Prensa de Peterson adaptada	20
Figura 3	– Processo de determinação de teor de umidade.....	22
Figura 4	– Briquete moído para determinação do teor de cinza	23
Figura 5	– Pesagem do material para análise do teor de cinza.....	23
Figura 6	– Determinação de volume pelo princípio de Arquimedes.....	25
Figura 7	– Dispositivo de queima para teste de combustão.....	26
Figura 8	– Resultado experimental do índice de combustão.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Delineamento experimental.....	21
Tabela 2	–	Teor de umidade e densidade aparente dos briquetes	28
Tabela 3	–	Resistência à compressão	30
Tabela 4	–	Efeitos de diferentes proporções de resíduos nas propriedades químicas dos briquetes	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Aspectos gerais da briquetagem	14
2.2	Uso de briquetes no Brasil e no mundo.....	14
2.3	Técnicas de briquetagem	15
2.4	Prensa de Peterson	16
2.5	Poder calorífico do briquete	17
2.6	Propriedades físicas do briquete	17
2.7	Propriedades químicas do briquete	18
2.8	Briquetes lignocelulósicos	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	Obtenção de matéria-prima	19
3.2	Produção dos briquetes	19
3.3	Avaliação dos briquetes	22
3.3.1	Determinação do teor de umidade	22
3.3.2	Preparo da amostra para análise química imediata.....	22
3.3.3	Determinação do teor de materiais voláteis	23
3.3.4	Determinação do teor de cinzas	24
3.3.5	Determinação do teor de carbono fixo	24
3.3.6	Determinação do poder calorífico.....	25
3.3.7	Densidade aparente	25
3.3.8	Propriedades mecânicas do briquete	25
3.3.9	Teste de combustão.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5	CONCLUSÃO	36
6	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

A madeira tem importância histórica no desenvolvimento da civilização. Essa importância tem relação com a abundância do produto lenhoso das florestas, bem como com a qualidade de suas propriedades físicas. A junção desses fatores possibilitou o seu uso em diversas funções e destaca sua importância social e econômica.

Em um contexto mundial, a utilização da madeira para energia reflete o nível de desenvolvimento dos países. Países em desenvolvimento tendem a depender mais da madeira no suprimento de energia no uso doméstico e industrial (BRITO, 2007). No Nordeste brasileiro, a utilização de lenha e carvão teve início com o uso da terra, estas eram as únicas fontes de energia disponíveis (RIEGELHAUPT; PAREYN, 2010). Os produtos florestais da Caatinga participam da matriz energética da região, embora a mesma não seja sempre quantificada (NDAGIJIMANA *et al.*, 2015).

No Rio Grande do Norte, por exemplo, onde a lenha alimenta as fornalhas da indústria de cerâmica, existe a necessidade de encontrar uma alternativa energética para ser inserida no setor. A lenha é a principal fonte de energia deste tipo de indústria no Estado e o desmatamento representa uma ameaça de desertificação em algumas regiões (SOUZA; PEREIRA; SANTOS, 2006).

A utilização de um produto alternativo à lenha é uma opção, uma vez que compactando pó de serra, maravalha, restos de culturas agrícolas ou resíduos da arborização, é possível obter um briquete com qualidade (QUIRINO, 1991). Porém, a indicação de determinada matéria como boa geradora de energia depende de análises químicas e da determinação de seu valor calorífico (PAULA, 2010).

No semiárido brasileiro, a pressão sobre a vegetação nativa é um problema que afeta a população em diversas escalas. A regeneração natural em áreas de caatinga é lenta, mas isso não é suficiente para barrar o avanço da supressão vegetal causado pelo acréscimo na demanda energética local.

Por sua vez, a necessidade de redução no volume de resíduos gerados e a destinação correta de cada tipo de resíduo produzido são preocupações recorrentes em centros urbanos. Pode-se reduzir os impactos gerados pelo descarte inadequado de resíduos e também diminuir a pressão sobre a vegetação nativa no suprimento energético local. A sociedade moderna precisa se direcionar no sentido do tratamento e destinação adequada de cada categoria de rejeito produzido.

O presente trabalho teve como objetivo encontrar uma alternativa à exploração massiva dos recursos renováveis ao apresentar uma proposta de produção de briquetes com três tipos de resíduos sólidos urbanos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da briquetagem

A briquetagem é uma forma de alta eficiência para concentrar a energia disponível na biomassa (QUIRINO; BRITO, 1991 a). O processo de fabricação de briquete é antigo e refere-se à aplicação de pressão em uma massa de material particulado, formando um produto sólido de alta densidade, com presença de um aglutinante ou não (FILIPPETTO, 2008).

Durante a briquetagem, os resíduos são densificados por meio de temperatura e pressão (PAULA, 2010). O aumento da temperatura faz com que a lignina amoleça e atue como ligante, dispensando a adição de um aglutinante (PANCIERI, 2009).

Considerando a densidade a granel e o poder calorífico médio, estima-se que 1 m³ de briquetes contém pelo menos 5 vezes mais energia que 1 m³ de resíduos não prensados (QUIRINO; BRITO, 1991b). Desta forma, esse processo pode transformar um resíduo de baixíssima densidade em briquetes de qualidade (SILVA, 2007). O briquete se caracteriza pelo alto poder calorífico de seu material, além de ser uma alternativa energética renovável (PANCIERI, 2009).

O interesse mundial pela compactação da biomassa é crescente, entretanto, não é uma inovação recente (SILVA, 2007). Qualquer tipo de resíduo lignocelulósico pode ser compactado, desde que esteja em condições de umidade e granulométrica para o processamento (CHRISOSTOMO, 2011).

A madeira compactada tem poder de queima exponencialmente maior. Sendo assim um material ideal para a utilização em vários tipos de empresas como padarias, pizzarias, caldeiras, olarias, entre outras (PANCIERI, 2009).

2.2. Uso de briquetes no Brasil e no Mundo

A participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, devido à queda da oferta interna de petróleo e expansão da geração hidráulica (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL- BEN, 2017). A comercialização de briquetes ainda não é difundida no Brasil e a expansão do mercado é um desafio, tendo em vista a necessidade de que o briquete apresente alto padrão de qualidade e maior desempenho energético (PROTÁSIO *et al.*, 2012).

Os briquetes de biomassa são usados principalmente para cozinhar e aquecer em países como EUA, Austrália, Japão, Coréia e Taiwan. Já em países em desenvolvimento, os briquetes de biomassa são principalmente utilizados para uso doméstico (SOTANNDE, OLUYEGE; ABAH, 2010).

A demanda de briquetes e *pellets* na Europa é de cerca de cinco milhões de toneladas por ano (DE ALMEIDA, 2011). Os *pellets* de madeira são pequenos cilindros de madeira, compactados e densos, produzidos com teor de umidade abaixo de 10% (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2013). Ainda segundo os mesmos autores, o baixo teor de umidade permite elevada eficiência na combustão. A geometria regular e cilíndrica dos *pellets* também permite a alimentação automática em um sistema industrial e a alimentação manual nos aquecedores residenciais, e, por ser *pellet* um produto natural, geralmente não tem elementos tóxicos na sua composição.

Em 2001, briquetes e *pellets* de resíduos eram comercializados na Europa por aproximadamente mil reais a tonelada, enquanto no Brasil, por volta de duzentos reais a tonelada (QUIRINO, 2001).

2.3 Técnicas de briquetagem

As técnicas de briquetagem podem ser distintas entre compactação quente e com alta pressão, e compactação fria e com baixa pressão. O processo de compactação que resulta num produto de maior qualidade é o processo que utiliza calor, alta pressão e processo contínuo (SILVA, 2007).

Equipamentos de compactação existentes no mercado são eficientes, porém são equipamentos industriais voltados à alta produtividade (QUIRINO, 2001), por exemplo:

Prensa extrusora de pistão mecânico: Consiste em um pistão ligado excentricamente a um grande volante que força o material a ser compactado por meio de um tronco de cone, (QUIRINO; BRITO, 1991). A compactação ocorre por meio de golpes produzidos sobre os resíduos por um pistão acionado através de dois volantes. Do silo de armazenagem os resíduos são transferidos para um dosador e briquetados em seguida (LIPPEL, 2017).

Prensa extrusora de rosca sem fim: Este equipamento trabalha sob o princípio da extrusão contínua, resulta em um produto altamente homogêneo, com alta densidade e resistência mecânica superior (LIPPEL, 2017). Neste processo, a matéria-prima é conduzida para a parte central do equipamento, chamada matriz, onde sofre intenso atrito e forte pressão,

o que eleva a temperatura (QUIRINO, 2001). O material é submetido a altas pressões, tornando-se mais compacto. No final do processo, o material é naturalmente resfriado, solidificando-se e produzindo um briquete com elevada resistência mecânica (LIPPEL, 2017).

Prensa hidráulica: Não é um processo extrusivo, a pressão aplicada é menor que em outros métodos, produz briquetes de menor densidade. É capaz de transformar em briquetes resíduos como: poeira fina, gerada por lixadeiras, ou serragem. A parte da frente do embolo abre e ejeta o briquete quando é atingida a pressão desejada (LIPPEL, 2017).

2.4. Prensa de Peterson

A prensa de Peterson foi criada pelo americano Bob Peterson como uma alternativa simples e economicamente viável para que pessoas em países em desenvolvimento pudessem produzir briquetes de biomassa sem a necessidade de aquisição de uma prensa industrial.

Com este modelo, pode-se produzir briquetes de baixo custo, utilizando folhas secas, capim, casca de café, resíduo de carvão, serragem, além de resíduos de papel. A *Peterson Press* é manuseada de maneira simples e eficiente, e resulta em briquetes que geram energia suficiente para ser empregada em diversas atividades, entre elas o cozimento de refeições (PETERSON, 2017). A prensagem é realizada por um macaco hidráulico acoplado em uma estrutura de metal ou madeira, bem como utiliza molde para a confecção dos briquetes (figura 1).



Figura 1. Prensa de Peterson
FONTE: Peterson (2017)

Este módulo de prensagem é utilizado em Uganda, Nigéria, Quênia, República Democrática do Congo, Congo, Camarões, Senegal, Gana, Haiti, Guatemala, México, Filipinas e Nepal, (PETERSON, 2017).

2.5. Poder calorífico do briquete

A qualidade de um briquete está diretamente ligada ao seu poder calorífico (ILHA FILHO; HALASZ; AKIRA, 2011). O poder calorífico consiste na quantidade de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa de material combustível, expressa em cal/g ou kcal/kg (PAULA, 2010). O poder calorífico é sempre positivo, sendo que quanto mais alto for o valor, maior será a energia que se pode aproveitar (FERNANDES, 2015).

A principal fonte de combustível usada em países em desenvolvimento é a madeira, pode ser usada como lenha ou como carvão, no entanto, o carvão tem um poder calorífico mais elevado (28,7 - 34 MJ/kg) quando comparado à madeira (20 - 26,5 MJ/Kg) (FUWAPE, 1996). Já o poder calorífico de briquetes depende do seu material de origem e do seu processo de formação. Por exemplo, para briquetes de carvão obtidos do resíduo da madeira de Nim (*Azadirachta indica*), foi observado que o poder calorífico variou de 32,27 MJ/Kg a 33,17 MJ/Kg (SOTANNDE; OLUYEGE; ABAH 2010).

2.6. Propriedades físicas do briquete

Briquetes apresentam forma regular, teor de umidade próxima a 8% e constituição homogeneizada pelo processo de compactação. Em briquetes de carvão vegetal de diferentes espécies, foi observada variação do teor de umidade de 5,45% até 8,72% (QUIRINO, 2001). Um teor de umidade de acima de 20%, pode reduzir o poder calorífico e gerar um produto final de segunda linha (ILHA FILHO; HALASZ; AKIRA, 2011).

Os briquetes variam de densidade a granel em função da forma e do diâmetro de produção adotados (QUIRINO, 2001). Para briquetes de carvão obtidos do resíduo da madeira de Nim, foi observado que a densidade variou de 0,45 a 0,75 g/cm³ (SOTANNDE; OLUYEGE; ABAH, 2010). Já os briquetes obtidos de carvão de *Gliricidia sepium* apresentaram variação de densidade entre 0,26 g/cm³ e 0,49 g/cm³ e 0,29 g/cm³ a 0,62 g/cm³ para briquetes de carvão de *Leucaena leucocephala* (FUWAPE, 1996).

2.7. Propriedades químicas do briquete

O teor de materiais voláteis e o teor de cinzas fornecem informações aproximadas da combustibilidade dos resíduos (PETRICOSKI, 2017). A maioria dos resíduos de biomassa tem baixo teor de cinzas (DIAS *et al.*, 2012). Um baixo teor de voláteis registrado pode indicar que o material não inflama com facilidade, mas quando aceso, queima de forma suave e sem muita fumaça (SOTANNDE; OLUYEGE; ABAH, 2010).

Para briquetes de carvão obtidos do resíduo da madeira de Nim, foi observado o teor de voláteis variando de 10% a 13%, o teor de cinzas variando de 3,5% a 6,25% e o carbono fixo variando de 82,75% a 87,25% (SOTANNDE, OLUYEGE; ABAH 2010).

Para briquetes de carvão obtidos do resíduo da madeira de *Gliricidia sepium*, foi observado o teor de voláteis em uma variação de 31% a 78%, o teor de cinzas variou de 1,1% a 3,8%, o carbono fixo, de 23% a 62% (FUWAPE, 1996). Ainda segundo o mesmo autor, para briquetes de carvão obtidos do resíduo da madeira de *Leucaena leucocephala*, foi observado o teor de voláteis variando de 36% a 74%, o teor de cinzas variando de 0,93% a 4,0%, o carbono fixo variando de 25% a 54%.

2.8. Briquetes lignocelulósicos

Os principais resíduos lignocelulósicos utilizados para produção de briquetes são palha de milho, pó de serra, serragem de madeira, casca de arroz e bagaço de cana (QUIRINO, 2001). Ainda segundo o autor, os resíduos lignocelulósicos apresentam baixa densidade, alto teor de umidade e são bem heterogêneos.

Briquetes produzidos com finos de carvão vegetal e resíduo celulósico são fonte viável para a geração de energia (MARTINS *et al.*, 2016). Os resíduos de papel e papelão podem ser utilizados como matéria-prima para este tipo de produção, pois são constituídos basicamente de celulose e alguns aditivos, e podem ser reciclados e valorizados energeticamente assim como a madeira (QUIRINO, 2001). A adição de amido de milho como aglutinante é imprescindível para obtenção de briquetes de maior densidade e resistência mecânica (MARTINS *et al.*, 2016). Uma alternativa é o uso de próprio resíduo da indústria de papel como aglomerante na fabricação de briquetes que podem gerar um produto com um poder calorífico equivalente a briquetes produzidos com outro tipo de aglomerante (ILHA FILHO; HALASZ; AKIRA, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Obtenção da matéria-prima

Para a confecção dos briquetes foram testadas diferentes composições de materiais lignocelulósicos provenientes de resíduos sólidos urbanos:

Resíduo de papel: Rejeitos de papel foram coletados e classificados dentro do Câmpus de Mossoró da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). O material foi separado de acordo com sua origem (papelão, papel para impressão, papel-jornal), foi reduzido de tamanho (manualmente ou auxiliado por uma tesoura) e separado de eventuais impurezas (grampos, fita adesiva, etc.). O material foi então submerso em água por um período aproximado de 24 horas. Em seguida, para cada tratamento, o material foi processado com auxílio de um liquidificador doméstico até adquirir o aspecto de polpa celulósica.

Serragem de madeira: As amostras de serragem foram coletadas em marcenarias e serrarias localizadas no município de Mossoró, RN. A coleta levou em consideração a espécie desdobrada/usinada utilizada, sendo coletadas amostras de serragem da espécie Maçaranduba (*Manilkara* sp), por ser uma das mais utilizadas no comércio local. O material foi processado em um moinho de faca com o objetivo de uniformizar o tamanho das partículas e posteriormente foi peneirado com auxílio de um conjunto de peneiras e um agitador para a sua caracterização. Foi observado que 60% do material particulado tinha dimensão de 0,5mm.

Finos de carvão: Os finos do carvão foram coletados em carvoarias da região próxima ao município de Mossoró, RN. O material foi processado em um moinho de faca com o objetivo de uniformizar o tamanho das partículas, foi observado que 57% do material apresentou dimensão de 0,5 mm.

3.2. Produção dos briquetes

Para o processo de briquetagem, foi desenvolvida uma prensa adaptada do modelo da *Peterson Press II*. A adaptação sugerida a essa prensa nesta pesquisa foi a construção de uma escala de prensagem para avaliação de diferentes tamanhos de briquetes em um mesmo método de produção (Figura 4). Seguindo o modelo Peterson, o módulo de prensagem é

composto por um macaco hidráulico (com capacidade máxima de carga de 2 toneladas) que faz a prensagem da matéria-prima.



Figura 2. Prensa de Peterson adaptada.
FONTE: O autor (2018)

A polpa celulósica proveniente do papel, papelão ou papel-jornal foi escorrida em uma peneira de 16 *mesh*. A pasta foi então misturada com os demais resíduos (pó de serra e/ou fino de carvão). A mistura foi feita manualmente até cada composição ter aparência uniforme.

A tabela 1 apresenta o delineamento experimental dos 9 tratamentos produzidos com diferentes composições de papel/papel-jornal/papelão, pó de serra e fino de carvão. A dosagem da matéria-prima utilizada na briquetagem foi feita como base no peso do material seco e em temperatura ambiente.

Tabela 1. Delineamento experimental

Tratamento	Composição	Proporção da mistura (%)
1	Papel offset	50
	Pó de serra	50
2	Papel offset	50
	Pó de serra	25
	Fino do carvão	25
3	Papel offset	50
	Fino do Carvão	50
4	Papelão	50
	Pó de serra	50
	Papelão	50
5	Pó de serra	25
	Fino do carvão	25
	Papelão	50
6	Fino do Carvão	50
	Papel-Jornal	50
7	Pó de serra	50
	Papel-Jornal	50
	Pó de serra	25
8	Fino do carvão	25
	Papel-Jornal	50
9	Fino do Carvão	50

Foram produzidas três repetições para cada tratamento. Os briquetes foram secos ao ar livre, com o tempo de exposição ao sol aproximado em 36 horas.

3.3. Avaliação dos briquetes

3.3.1. Determinação do teor de umidade

Os briquetes produzidos foram pesados e posteriormente submetidos a uma estufa com temperatura de $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ por 24 horas (Figura 5). Os briquetes secos foram novamente pesados em uma balança de precisão e o teor de umidade determinado pela equação 3:

$$\text{Teor de Umidade (\%)} = [(A-B) / A] \times 100 \quad (3)$$

Em que:

A= Gramas de amostra seca ao ar;

B= Gramas de amostra após secagem a 105°C .



Figura 3. Processo de determinação de teor de umidade.
FONTE: O autor (2018).

3.3.2. Preparo da amostra para análise química

Paras as análises químicas, o briquete foi seco a 105°C durante 24 horas e foi moído por fricção (figura 6). Então foi separado 1 g de amostra por repetição, para cada tratamento (figura 7), e posteriormente foram levados à mufla para início dos testes.



Figura 4. Briquete moído para determinação do teor de cinza.
FONTE: O autor (2018)



Figura 5. Pesagem do material para análise do teor de cinza.
FONTE: O autor (2018).

3.3.3. Determinação do teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis foi determinado pela ASTM D 1762 (1984) adaptada. A norma prevê que o teste deve ser feito em mufla a 950°C. Cadinhos com tampa e com a amostra devem ser colocados na mufla da seguinte maneira: com a porta do forno aberta, por 2 minutos na extremidade externa do forno (300°C) e depois por 3 minutos na beirada do forno. Então deve-se mover as amostras para o fundo do forno por 6 minutos com a mufla fechada. Em seguida, resfriar as amostras em dissecador por 1 hora e pesar.

Devido às limitações para realização do teste, o mesmo foi adaptado e realizado da seguinte forma: a mufla foi carregada de amostras preparadas como citado em 3.3.2 ainda desligada, foi programada para aquecer até a temperatura de 950°C, na qual permaneceu por 7

minutos e então foi desligada. O material foi resfriado em dessecador por uma hora e pesado em balança analítica de precisão.

A porcentagem de materiais voláteis foi determinada pela equação 4:

$$\text{Materiais Voláteis (\%)} = [(B - C) / B] \times 100 \quad (4)$$

Em que:

B = Gramas de amostra após secagem a 105°C

C = Gramas de amostra após secagem a 950°C

3.3.4. Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado pela ASTM D 1762 (1984). Para a realização desse teste, os cadinhos com a amostra foram colocados em uma mufla a 750°C, por 6 horas. Após resfriar em dessecador por 1 hora, as amostras foram pesadas. O cálculo da porcentagem de cinzas em amostra, foi realizado pela equação 5:

$$\text{Cinzas (\%)} = (D / B) \times 100 \quad (5)$$

Em que:

CZ = Teor de cinzas

D = Gramas de resíduo

B = Gramas da amostra após a secagem a 105° C.

3.3.5 Determinação do teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado de forma indireta, pela soma dos teores de materiais voláteis (%) e o teor de cinzas (%), decrescido de 100, na equação 6:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (6)$$

Em que:

CF = Teor de carbono fixo, %.

CZ = Teor de cinzas, %.

MV = Teor de materiais voláteis, %.

3.3.6 Poder Calorífico

A determinação do poder calorífico é dada por meio de calorímetros, no entanto, pode-se estimá-lo por métodos empíricos, como exposto por Fuwape (1996), aplicando a fórmula Gouthal, representada pela equação 7:

$$HV = 2,326 (147,6 C + 144 V) \quad (7)$$

Em que:

HV= Valor de aquecimento bruto,

C= Porcentagem de carbono fixo,

V= Porcentagem de voláteis.

3.3.7 Densidade aparente

A densidade aparente é definida como a relação entre a massa do briquete e seu volume, determinada na mesma condição de umidade. Para esta análise, o peso foi medido em balança de precisão. O volume foi calculado pelo método estereométrico por imersão que leva em consideração o princípio de Arquimedes (Figura 8). Para evitar que houvesse mudança no volume devido à absorção de água, o material foi previamente envolto em um filme PVC para evitar o contato direto da amostra com a água.



Figura 6. Determinação de volume pelo princípio de Arquimedes
FONTE: O autor (2018).

3.3.8 Propriedades Mecânicas

O teste de carga foi realizado para determinar a resistência dos briquetes à compressão em máquina universal de ensaios mecânicos da marca EMIC, a uma força máxima de 100kN,

com velocidade de carregamento de 0,1 mm/s e limite de deformação de 25,4 mm. A carga foi aplicada na menor dimensão do briquete. A resistência à compressão foi determinada pela relação entre carga máxima aplicada e a área transversal do briquete. Também foi calculado o módulo de elasticidade na compressão a partir da equação 9:

$$E_c = ((\sigma_{40\%} - \sigma_{10\%}) / (\epsilon_{40\%} - \epsilon_{10\%})) \quad (9)$$

Em que:

$\sigma_{10\%}$ - Tensão de compressão correspondentes a 10%

$\sigma_{40\%}$ - Tensão de compressão correspondentes a 40% .

$\epsilon_{10\%}$ - Deformação específica medida no corpo de prova, correspondente à tensão de $\sigma_{10\%}$.

$\epsilon_{50\%}$ - Deformação específica medida no corpo de prova, correspondente às tensão de $\sigma_{40\%}$ E_c = Módulo de elasticidade, em MPa.

3.3.9 Teste de combustão

O teste de combustão foi realizado com a intenção de avaliar o desempenho dos briquetes durante a combustão. A análise do poder de combustão dos briquetes foi realizada tendo como base o trabalho de Da Cruz *et al.* (2016), em que foi elaborado um dispositivo de queima em alumínio, um pedaço de madeira, uma balança de precisão e um pirômetro, como apresentado na figura 9.



Figura 7. Dispositivo de queima.
FONTE: O autor (2018).

Após a montagem do dispositivo sobre a balança, este foi carregado com uma amostra de briquete (para cada amostra foi preparado um disco de 5 cm de altura) e a queima teve duração de 60 minutos. A ignição ocorreu a partir do uso de um maçarico de cozinha com a chama aplicada por 1 minuto em cada lado da amostra. As medições de peso e temperatura (com auxílio de pirômetro) começaram 5 minutos após a amostra acesa. Observou-se a massa e a temperatura em função do tempo.

O índice de combustão é adimensional e foi calculado pela equação 8 em um teste de 60 minutos.

$$\text{ICOM} = (A \times B) / (100 \times C) \quad (8)$$

Em que:

A é a % do tempo na qual a temperatura permanecerá acima de 150°C;

B é a % da temperatura máxima atingida em relação a temperatura de 150°C; e

C é a % de massa total consumida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização dos briquetes obtidos a partir da combinação de cinco tipos de resíduos lignocelulósicos iniciou-se com a determinação do teor de umidade e da densidade aparente, como apresentado na tabela 2.

Tabela 2- Teor de umidade e densidade aparente dos briquetes.

TRATAMENTO	Teor de Umidade (%)	Densidade aparente (g/cm ³)
1	8,91 d (0,02)	0,47 b c (0,04)
2	8,02 e (0,02)	0,52 a b (0,02)
3	6,89 g (0,03)	0,53 a (0,03)
4	10,49 b (0,01)	0,38 d e (0,06)
5	8,91 d (0,01)	0,42 c d (0,04)
6	7,54 f (0,02)	0,48 a b (0,03)
7	11,15 a (0,01)	0,32 g (0,08)
8	9,57 c (0,01)	0,37 e f (0,01)
9	8,19 e (0,03)	0,36 e f (0,06)

Em que: Os valores seguidos da mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Coeficiente de variação entre parênteses.

O teor de umidade apresentou variação de 6,89 até 11,15% entre os tratamentos. Ao se comparar a umidade dos briquetes em relação ao tipo de aglomerante (papel *offset*, papelão ou papel-jornal), foi possível notar que as composições aglomeradas com papel *offset* (papel *offset* + pó de serra (tratamento 1), papel *offset* + pó de serra + carvão (tratamento 2), papel *offset* + carvão (tratamento 3)), tiveram menor teor de umidade que os briquetes aglomerados com papelão ou com papel-jornal. Por sua vez, quando a comparação foi relacionada à proporção da mistura (50% aglomerante + 50% pó de serra, 50% aglomerante + 25% pó de serra + 25% carvão, 50% aglomerante + 50% carvão) percebeu-se que houve uma tendência de os briquetes compostos por 50% aglomerante + 50% carvão serem menos úmidos do que

nas outras proporções. Os tratamentos 3 (papel *offset* + carvão), 6 (papelão + carvão), 9 (papel-jornal + carvão), foram os tratamentos de menor teor de umidade, 6,89; 7,54 e 8,19%, respectivamente.

De acordo com Ilha Filho, Halasz e Akira (2011), o teor de umidade encontrado para briquetes aglomerados com 10, 20 e 30% de resíduos de celulose e papel foi de 14,4; 14,7 e 14,9%, respectivamente, superior aos produzidos neste trabalho. Já para Martins *et al.* (2016), a umidade observada em briquetes compostos por 60% de carvão vegetal e 40% de resíduo celulósico foi de 11,03% e 10,87% em briquetes compostos por 55% de carvão vegetal e 45% de resíduo celulósico. Nesse trabalho não ficou evidente nenhuma relação entre menor umidade dos briquetes e maior proporção de carvão na mistura.

A maior densidade encontrada foi de 0,53g/m³, atribuída ao tratamento 3 (50% papel *offset* + 50% carvão), que também apresentou o menor teor de umidade. Quando a comparação da densidade foi em relação ao tipo de aglomerante, observou-se que as composições aglomeradas com papel *offset* foram mais densas que as composições aglomeradas com papelão e papel-jornal. Quando relacionada à proporção da mistura, percebeu-se que a densidade foi maior nas composições 3 (50% papel *offset* + 50% carvão), e 6 (50% papelão + 50% carvão). Este comportamento não se repetiu para os tratamentos aglomerados com papel-jornal, em que o tratamento 8 (50% aglomerante + 25% pó de serra + 25% carvão) foi o mais denso.

Em relação à densidade, Ilha Filho, Halasz e Akira (2011) relataram resultados em que quanto maior a proporção de carvão na mistura dos seus tratamentos, mais denso foi o briquete. Afirmando a tendência das composições com maior proporção de carvão apresentarem maiores densidades, assim como observado neste trabalho.

As propriedades mecânicas de compressão e módulo de elasticidade dos briquetes produzidos foram apresentadas na tabela 3.

Tabela 3- Propriedades mecânicas.

TRATAMENTOS	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	4,47 a b (0,23)	0,150 a b (0,2)
2	6,29 a (0,05)	0,203 a b (0,05)
3	4,48 a b (0,67)	0,266 a (0,48)
4	1,33 b (0,06)	0,050 b (0,06)
5	3,14 a b (0,22)	0,113 a b (0,19)
6	4,34 a b (0,24)	0,152 a b (0,2)
7	1,28 b (0,05)	0,044 b (0,05)
8	1,90 a b (0,06)	0,063 b (0,06)
9	2,56 a b (0,01)	0,088 a b (0,02)

Em que: Os valores seguidos da mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Coeficiente de variação entre parênteses.

Quanto às propriedades mecânicas dos briquetes, a resistência à compressão variou de 1,28 a 6,29 MPa, sendo que o tratamento 2 (50% papel offset + 25% carvão + 25% pó de serra), apresentou maior resistência à compressão, de 6,29 MPa. Devido às características do material utilizado na confecção dos briquetes, não foi possível identificar a carga de ruptura para os nove tratamentos. Briquetes com composições aglomeradas com papel offset apresentaram maiores valores que os tratamentos aglomerados com papelão ou papel-jornal. Notou-se também que entre os briquetes aglomerados com papelão e papel-jornal, as composições de 50% aglomerante + 50% de carvão apresentaram maior resistência à compressão, 4,34 e 2,56 MPa, respectivamente.

No trabalho apresentado por Martins *et al.* (2016), percebeu-se que quanto maior a quantidade de resíduo lignocelulósico, maior foi a resistência à compressão em tratamentos sem a adição de amido. Esta relação entre maior proporção de resíduo lignocelulósico e maior resistência à compressão também foi perceptível nesse trabalho.

Em relação ao módulo de elasticidade, o tratamento 3 (50% papel *offset* + 50% carvão) foi o tratamento que apresentou maior MOE, 0,266 MPa. A resistência ao módulo de elasticidade foi muito próxima entre os tratamentos compostos com mesmo tipo de

aglomerante. Os tratamentos 4 (50% papelão + 50% pó de serra), 7 (50% papel-jornal + 50% pó de serra) e 8 (50% papel-jornal + 25% carvão +25% pó de serra) apresentaram menor MOE, estatisticamente iguais, e os que mais diferem do tratamento 3, que apresentou melhor comportamento. Também foram observados comportamentos aproximados nos testes para tratamentos de iguais proporções de madeira, mesmo sendo compostos por diferentes aglomerantes. Isto se repetiu nos tratamentos de igual proporção de carvão e de igual proporção de madeira e carvão. Os baixos valores para a resistência ao módulo de elasticidade indicaram que o material possui alta deformabilidade.

A tabela 4 apresenta os resultados experimentais para o efeito de diferentes combinações de resíduos sólidos urbanos nas propriedades químicas relacionadas à combustão.

Tabela 4- Efeitos de diferentes proporções de resíduos nas propriedades químicas dos briquetes.

TRATAMENTOS	PARÂMETROS			
	Materiais Voláteis	Carbono Fixo	Cinzas	Poder Calorífico
		(%)		(MJ/Kg)
1	7,70 c (0,21)	88,38 b (0,03)	3,93 b c (0,65)	32,92 b c d (0,02)
2	11,93 b (0,02)	82,69 c (0,02)	5,38 b (0,38)	32,38 e (0,02)
3	15,23 a (0,02)	76,64 d (0,02)	8,13 a (0,21)	31,42 d (0,02)
4	1,67 e (0,17)	95,89 a (0,01)	2,44 c d (0,23)	33,48 a b c (0,01)
5	3,96 d (0,10)	94,99 a (0,02)	1,05 e (3,71)	33,94 a (0,01)
6	8,97 c (0,04)	86,53 b (0,01)	4,50 b c (0,07)	32,71 c d (0,003)
7	1,76 e (0,88)	96,34 a (0,02)	1,89 c d (0,51)	33,66 a b (0,01)
8	3,19 de (0,03)	96,03 a (0,004)	0,77 e (0,4)	34,04 a (0,003)
9	13,35 ab (0,003)	82,89 c (0,01)	3,76 a b (0,34)	32,93 b c d (0,01)

Em que: Os valores seguidos da mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Coeficiente de variação entre parênteses.

Os valores encontrados para materiais voláteis entre as diferentes composições variaram de 1,67 a 15, 23%. O tratamento 3 (50% papel offset + 50% carvão) apresentou a maior média para materiais voláteis, com valores médios de 15,23%, seguido do tratamento 9 (50% papel-jornal + 50% carvão), com média de 13,35%. Estes tratamentos diferiram estatisticamente dos tratamentos 4 (50% papelão + 50% pó de serra) e 7 (50% papel-jornal + 50% pó de serra) que, por sua vez, foram estatisticamente iguais entre si e apresentam valores de material volátil menor que os demais tratamentos, 1,67 e 1,76%, respectivamente. Estes valores indicam uma queima mais lenta em relação aos tratamentos 3 e 9 que possuem maior teor de material volátil. Os tratamentos 5 (50% papelão + 25% carvão + 25% pó de serra) e 8 (50% papel-jornal + 25% carvão + 25% pó de serra) apresentaram um comportamento aproximado aos tratamentos 4 e 7, no entanto, diferiram de todos os outros tratamentos que apresentam maior teor de material volátil. Não existiu um padrão de comportamento para voláteis quando o uso de diferentes aglomerantes na composição dos briquetes foi considerado.

A quantidade de materiais voláteis se relaciona diretamente com a queima no processo de carbonização, quanto maior o teor de materiais voláteis, mais rápida é a queima (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Martins *et al.* (2016) apresentaram resultados em que é possível perceber que o teor de material volátil aumentou à medida que a proporção de carvão diminuiu e a proporção de resíduos lignocelulósicos aumentou entre seus tratamentos. Este comportamento não foi observado neste trabalho.

O teor de materiais voláteis em briquetes de carvão de resíduo da madeira de Nim apresentou variação de 10,65 a 13%, para briquetes com diferentes aglutinantes (SOTANNDE; OLUYEGE; ABAH, 2010). Quanto maior o teor de voláteis, maior a ignição do material (OSHIRO, 2016), o que implica dizer que os baixos teores de materiais voláteis encontrados indicam que os briquetes necessitam de um tempo maior de ignição, no entanto, após aceso tende a queimar uniformemente. Nesse trabalho, verificou-se que os tratamentos que apresentaram menor teor de voláteis, apresentaram maior porcentagem de carbono fixo, bem como maior poder calorífico.

Ainda conforme os resultados apresentados na tabela 4, observou-se uma variação no teor de carbono fixo no intervalo de 76,64 até 96,34% entre os diferentes tratamentos de briquetes de resíduos sólidos urbanos. O tratamento 3 (50% papel offset + 50% carvão), apresentou a menor média para o carbono fixo entre os tratamentos, 76,64%. Em relação a

diferentes composições aglomerantes, os tratamentos aglomerados com papelão e papel-jornal apresentaram maiores médias para teor de carbono fixo que os tratamentos aglomerados com papel *offset*, essa diferença pode ter relação com o tipo de fibra que compõe cada papel usado como aglomerante.

Para diferentes proporções de misturas, observou-se que tanto os tratamentos 4 e 7, quanto os tratamentos 5 e 8 possuíram o mesmo padrão de comportamentos e não diferiram entre si. Os tratamentos 4 (50% papelão + 50% pó de serra), 5 (50% papelão + 25% carvão + 25% pó de serra), 7 (50% papel-jornal + 50% pó de serra) e 8 (50% papel-jornal + 25% carvão + 25% pó de serra), foram estatisticamente iguais e apresentaram as maiores médias 95,89; 94,99; 96,34 e 96,06%, respectivamente.

Martins *et al.* (2016) encontraram resultados que indicaram que quanto mais resíduo lignocelulósico e menor quantidade de carvão, maior o teor de carbono fixo. Segundo Oshiro (2016), quanto maior o valor de carbono fixo, maior o calor gerado durante a combustão. No entanto, o carbono fixo não tem uma relação direta com cinzas e materiais voláteis. Fuwape (1996), encontrou valores de carbono fixo no intervalo de 23 a 62% para briquetes de carvão de *Gliricidia sepium* e 25 a 59% para briquetes de carvão de *Leucaena leucocephala*.

Em relação ao teor de cinzas, os tratamentos diferiram estatisticamente entre si. Foi observada uma variação de 0,77 até 8,13% entre os tratamentos. O tratamento com o maior teor de cinzas foi o tratamento 3 (50% papel *offset* + 50% carvão) com 8,13%, seguido do tratamento 9 (50% papel-jornal + 50% carvão), com 3,76%. Os tratamentos 5 (50% papelão + 25% carvão + 25% pó de serra) e 8 (50% papel-jornal + 25% carvão + 25% pó de serra), apresentaram menor teor de cinzas e essa diferença pode estar relacionada a uma maior quantidade de resíduo lignocelulósico nas composições desses briquetes, que consequentemente apresentaram os maiores valores de poder calorífico dentre os demais tratamentos. Não existiu um padrão de comportamento para o teor de cinzas nas composições com diferentes tipos de aglomerante, no entanto, os tratamentos aglomerados com papelão apresentaram menor teor de cinzas. Já em relação às diferentes proporções de mistura, os tratamentos compostos por 50% aglomerante + 50% carvão apresentaram as maiores médias.

Segundo Carvalho (2010), um bom combustível sólido deve ter um conteúdo de cinzas inferior a 3%. Para Gonçalves, Sartori e Leão (2009), o ideal após a queima dos briquetes é que haja a menor quantidade de cinzas, o acúmulo de resíduo após a queima pode diminuir o poder calorífico. Ainda segundo o mesmo autor, briquetes com menores quantidades residuais de cinza após a queima possuem maior teor de combustíveis. Martins *et*

al. (2016) apresentaram resultados experimentais para teor de cinzas de 24,33% para briquetes com 45% de resíduos lignocelulósicos e de 26,67% para briquetes com 40% de resíduos lignocelulósicos, que mostra uma tendência em aumentar o teor de cinzas à medida que diminui a proporção de resíduo lignocelulósico. Esta relação também pode ser observada nesse trabalho.

Houve diferença estatística para os valores médios de poder calorífico (tabela 4). Os resultados variaram entre 31,42 e 33,94 MJ/Kg para os 9 tratamentos com combinações de resíduos sólidos urbanos. Os tratamentos 5 (50% papelão + 25% carvão + 25% pó de serra) e 8 (50% papel-jornal + 25% carvão + 25% pó de serra) que apresentaram o menor teor de cinzas, apresentaram também as maiores médias para poder calorífico: 33,94 e 34,04 MJ/Kg, respectivamente. Portanto, possuem a capacidade de produzir maior quantidade de calor durante a combustão.

Ao comparar o poder calorífico dos briquetes em relação aos diferentes aglomerantes utilizados, percebe-se que os briquetes aglomerados com papelão e papel-jornal tendem a ter maior poder calorífico que os briquetes aglomerados com papel *offset*. No entanto, os maiores resultados médios do poder calorífico em relação às diferentes proporções de mistura foram associados aos tratamentos compostos de 50% aglomerante + 25% carvão + 25% pó de serra, no caso de tratamentos aglomerados com papelão e papel-jornal. Este comportamento não se repetiu para os tratamentos aglomerados com papel *offset*, em que a composição com 50% papel *offset* + 50% pó de serra apresenta a maior média.

No trabalho de Martins *et al.* (2016), não foi observada a relação entre o menor teor de cinzas e o maior poder calorífico identificada nesse trabalho. Quanto maior o poder calorífico, maior é energia contida no combustível (CARVALHO, 2010). Fuwape (1996), encontrou valores entre 22,11 e 31,70 MJ/Kg para briquetes de carvão de *Gliricidia sepium*, enquanto para *Leucaena leucocephala* o poder calorífico encontrado variou entre 22,03 e 32,76 MJ/Kg. Já Sotannde, Oluyeye e Abah (2010) encontraram para carvão de resíduo de madeira de Nim, valores de poder calorífico entre 32,09 e 33,54 MJ/Kg.

Ao analisar o índice de combustão pode-se perceber que houve uma variação de 1,58 a 2,23, com apresentado na figura 10.

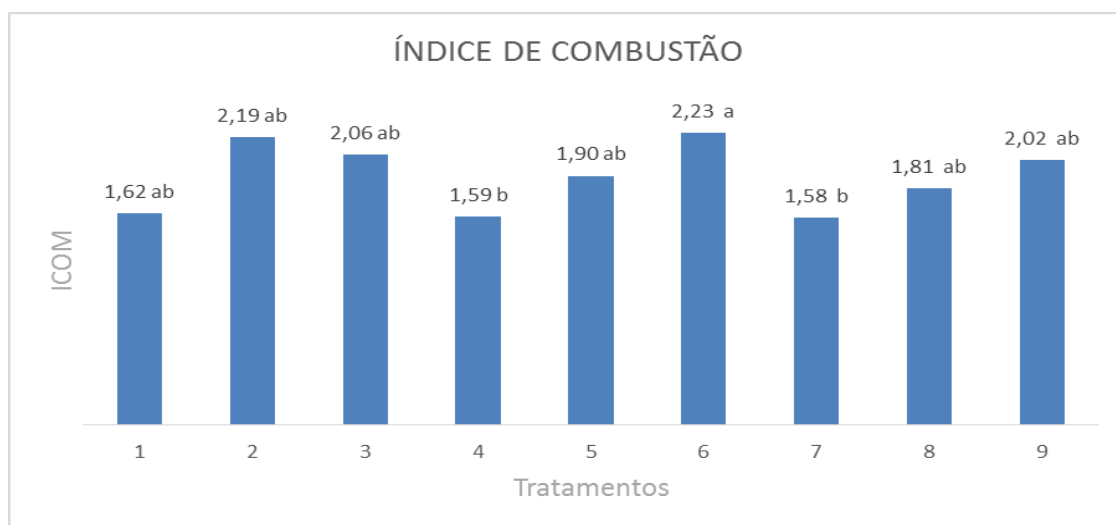


Figura 8. Resultado experimental do Índice de combustão.
 FONTE: O autor (2018).

O comportamento do índice de combustão em relação aos tipos de aglomerantes utilizados na composição dos briquetes foi semelhante para todos os tratamentos. Quando a análise considerou a proporção da composição das misturas, notou-se uma tendência dos tratamentos compostos por 50% aglomerante + 25% carvão + 25% pó de serra, possuírem maior ICOM, seguidos dos tratamentos compostos por 50% aglomerante + 50% carvão.

Os tratamentos 4 (50% papelão + 50% pó de serra) e 7 (50% papel-jornal + 50% pó de serra) foram estatisticamente iguais e apresentaram menor ICOM. Esse resultado indicou que estes tratamentos apresentam menor capacidade de manter a energia da combustão quando comparados com o tratamento 6 (50% papelão + 50% carvão), que apresentou maior índice de combustão (2,23).

Diferentemente do que foi indicado por Quirino (1991), houve uma correlação entre o índice de combustão e a densidade aparente dos corpos de prova produzidos com resíduos. Os tratamentos que apresentaram o maior ICOM também apresentaram maior densidade, sugerindo que quanto maior a densidade do briquete maior será o tempo de disponibilidade de energia a partir da queima.

5 CONCLUSÃO

Com base nos testes executados, nos resultados apresentados e nas discussões realizadas neste trabalho, pode-se concluir que:

- O uso de resíduos sólidos urbanos para a produção de briquetes pode ser uma alternativa energética viável, uma vez que existe o resíduo, a necessidade de destinação correta e a demanda por este tipo de produto de baixo custo.
- O uso de uma mistura de carvão e pó de madeira resultou em briquetes de maior poder calorífico.
- Os briquetes aglomerados com papelão e papel-jornal tendem a ter maior poder calorífico que os briquetes aglomerados com papel *offset*.
- Briquetes produzidos com finos de carvão, independente do tipo de aglomerante celulósico usado, tendem a apresentar boas médias de poder calorífico e de índices de combustão.
- Recomenda-se a realização de novos estudos, com outros tipos de matérias-primas, utilizando a prensa de Peterson adaptada que foi desenvolvida neste trabalho. Por exemplo, faz-se necessária uma avaliação do efeito do uso de outros materiais aglutinantes, como fécula de mandioca, o amido de milho e o melaço de cana aplicados aos tratamentos de melhor desempenho energético para fins de verificação quanto à melhoria na geração de energia e também melhoria na resistência do briquete produzido.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1762 - 84**: Standard method for chemical analysis of wood charcoal. 1990
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2017: **Ano base 2016 / Empresa de Pesquisa Energética**. – Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**. v. 21, n. 59, p.185-193, jan./mar. 2007
- CARVALHO JÚNIOR, R.M. **Desenvolvimento e análise energética do processo de obtenção do biodiesel de microalga por metanólise *in situ***. Dissertação (Mestrado) UFPR, Curitiba – PR, 2010.
- CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. 2011. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- DE ALMEIDA, A. N.; ÂNGELO, H.; GENTIL, L. V. Demanda de briquete de madeira. **Floresta**, v. 41, n. 1, p.73-78, 2011.
- DIAS, J. M. C. S.; SANTOS, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. 130p.
- DA CRUZ, B. C. C.; SILVA, D. A.; OLIVEIRA, A. S.; SANTOS, A. B. Produção de Briquetes de Resíduos Agrícolas e de Serraria, Acrescido de Resina de Breu Amarelo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Palotina, v. 5, n. 2, p. 238-252, 2016.
- FERNANDES, P. I. C. **Estudo da biomassa florestal residual consumida em centrais termoeletricas**. 2015. 76f. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia de Energia e Ambiente) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.
- FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 2008. 61 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- FUWAPE, J. A. Effects of carbonization temperature on charcoal from some tropical trees. **Bioresource technology**, v.57, n.1, p. 91-94, 1996.
- GARCIA, D.P.; CARASCHI, J.C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, Caxias do Sul v. 135, n. 2, p. 14-18, 2013.
- GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.5, p. 657-661, 2009.

ILHA FILHO, A. B.; HALASZ, M.R.T.; AKIRA, A. **Caracterização de briquetes produzidos com cascas de eucalipto e rejeitos de papel e celulose**. VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis- Vitória – ES - BRASIL - 2011

LIPPEL (Agrolândia - Santa Catarina - Brasil). **Briquetadeiras de Extrusão por Parafuso:** para Produção em Média Escala. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/categorias/compactacao/briquetagem-e-peletizacao-de-biomassa.html>>. Acesso em 22 de set. 2017.

MARTINS, M. P., BENÍCIO, E. L., JÚNIOR, A. F. D., DE ALMEIDA, R. B., DE CARVALHO, A. M., & YAMAJI, F. M. Produção e avaliação de briquetes de finos de carvão vegetal compactados com resíduo celulósico proveniente da indústria de papel e celulose. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 1, p. 173-180, 2016.

NDAGIJIMANA, C.; PAREYN, F. G. C.; RIEGELHAUPT, E.M.; Uso Do Solo E Desmatamento Da Caatinga: Um Estudo De Caso Na Paraíba E No Ceará – Brasil. In: GARIGLIO, M. A; PAREYN, F. G. C; VIEIRA, J. L. **Estatística Florestal da Caatinga**. Recife: Associação Plantas do Nordeste- APNE, 2015. p.19-142.

OLIVEIRA, L. H.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; YAMAJI, F. M.; SETTE JÚNIOR, Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 683-691, 2017.

OSHIRO, T. L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulosicos**. 2016. 58p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina 2016.

PANCIERI, B. M. A produção de briquetes como incentivo à sustentabilidade- Aplicabilidade da logística reversa em madeiras no município de Tomé- Açú. In: XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador- BA, 2009.

PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. 83f. Dissertação (Mestrado em Processamento e utilização da madeira). Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PETERSON, B. **Peterson Press, o fabricante de briquete de combustível biomassa**. Peterson Press, 2017. Disponível em: < <http://petersonpress.org/>>. Acesso em: 03/03/2018.

PETRICOSKI, S. M. **Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca**. 2017. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

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

QUIRINO, W. F. **Características de briquetes de carvão vegetal e seu comportamento na combustão**. 1991. 80f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) ESALQ/LISP, Piracicaba, 1991.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos**. Brasília, DF: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1991a.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1991b.

QUIRINO, W. F.; **Utilização Energética de Resíduos Vegetais**. Brasília: IBAMA/LPF, 2001. 35p. Disponível em: < <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf> > Acesso em: 21 Jan 2017.

RIEGELHAUPT, E. M.; PAREYN, F. G. C. A questão energética - CAATINGA. Caracterização Do Bioma Caatinga. In: GARIGLIO, M. A., SAMPAIO, E. D. S., CESTARO, L. A., KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. (2.ed.). Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. p. 27-96.

SILVA, C. A. D., **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos**. Campinas, SP: [s.n.], 2007.

SOTANDE, O. A.; OLUYEGE, A. O.; ABAH, G. B. Physical and combustion properties of charcoal briquettes from neem wood residues. **International Agrophysics**, Lublin, v. 24, n. 2, p. 189-194, 2010.

SOUZA, S. R.; PEREIRA, R.; SANTOS, C. M. Levantamento de autos de infração pelo IBAMA/RN relacionados aos empreendimentos de cerâmica no estado do Rio Grande do Norte. **Revista Holos**, Natal, v. 22, p. 21-44, 2006.