



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZ EURICO JUCÁ TÁVORA

ESTUDO DO PARÂMETRO FRIABILIDADE EM BRIQUETES DE BIOMASSA

FORTALEZA

2017

LUIZ EURICO JUCÁ TÁVORA

ESTUDO DO PARÂMETRO FRIABILIDADE EM BRIQUETES DE BIOMASSA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- T237e Távora, Luis Eurico Jucá.
Estudo do parâmetro friabilidade em briquetes de biomassa / Luis Eurico Jucá Távora. – 2017.
53 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.
Orientação: Profa. Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios.
1. Friabilidade. 2. Biomassa. 3. Briquetes. I. Título.

CDD 620.1

LUIZ EURICO JUCÁ TÁVORA

ESTUDO DO PARÂMETRO FRJABILIDADE EM BRIQUETES DE BIOMASSA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: 25/07/2017.

BANCA EXAMINADORA


Prof.ª Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof. Dr. Claus Franz Wehmann

Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB


Prof. Me. Paulo Herbert França Maia Júnior

Faculdade Maurício de Nassau

RESUMO

A busca por tecnologias que avancem no sentido da diminuição do uso de combustíveis fósseis, seja por conta de restrições advindas de metas globais de poluição ou por uma drástica redução da oferta dessa fonte de energia – tornando processos alimentados pela energia da queima desse tipo de combustível insustentáveis – fomenta as pesquisas em geração de energia baseada em recursos renováveis. A utilização da biomassa como combustível se mostra uma alternativa para a geração de energia. A produção de briquete (compactação da biomassa), geralmente obtida a partir de rejeitos de outros processos, é crescente na Europa e possui, no Brasil, condições favoráveis para um amplo crescimento, o que já vem sendo observado por pesquisadores e empreendedores atentos às causas ligadas à sustentabilidade. Dentro de todo o processo produtivo dos briquetes, além de características bioquímicas, um parâmetro físico de fundamental importância para o processo e para o consumidor final é a friabilidade, que fornece indícios da resistência ao impacto e à abrasão, eventos recorrentes durante o processo de fabricação, transporte e manuseio do produto. O estudo desse parâmetro visa à produção de briquetes de maior qualidade. Neste cenário, o presente trabalho teve como objetivo o estudo da friabilidade, observando a influência das propriedades de fabricação (carga de compressão aplicada, massa dos briquetes, umidade do material a ser comprimido) e o comportamento dos combustíveis fabricados, em diferentes condições no teste de friabilidade. Utilizou-se um friabilômetro de bancada para a realização de 03 (três) experimentos nos briquetes de bagaço de cana, Andiroba e da mistura de quatro espécies (Andiroba, Muiracatiara, Maçaranduba e *pinus sp*). A velocidade de rotação foi variada em 10 rpm, 25 rpm e 50 rpm para investigação da influência do referido parâmetro nos resultados obtidos com o método utilizado. Outro parâmetro investigado foi a carga de compactação, a qual variou em 24,2 MPa, 48,4 MPa e 72,6 MPa. Todos os ensaios foram realizados em triplicata, totalizando 81 execuções.

Palavras-chave: Friabilidade. Biomassa. Briquetes.

ABSTRACT

The search for technologies that are moving towards the reduction of the use of fossil fuels, either because of restrictions resulting from global pollution targets or by a drastic reduction in the supply of this energy source - making processes fueled by the energy of burning that type of fuel unsustainable - fosters research into energy generation based on renewable resources. The use of biomass as fuel is an alternative for the generation of energy. The briquette production (compaction of biomass), usually obtained from tailings from other processes, is growing in Europe and has favorable conditions in Brazil for a broad growth, which has already been observed by researchers and entrepreneurs attentive to the causes linked to sustainability. Within the entire briquettes production process, besides biochemical characteristics, a physical parameter of fundamental importance to the process and to the final consumer is friability, which provides evidence of resistance to impact and abrasion, recurring events during the manufacturing process, transportation and handling of the product. The study of this parameter aims at the production of briquettes of higher quality. In this scenario, the present work had as its objective the study of the friability, observing the influence of the manufacturing properties (applied compression load, briquettes mass, moisture of the material to be compressed) and the behavior of the manufactured fuels under different test conditions of friability. A benchtop friabilometer was used to carry out three (3) experiments on the briquettes of bagasse, Andiroba and the mixture of four species (Andiroba, Muiracatiara, Maçaranduba and *pinus sp*). The speed of rotation was varied at 10 rpm, 25 rpm and 50 rpm to investigate the influence of this parameter on the results obtained with the method used. Another parameter investigated was the compaction load, which varied in 24,2 MPa, 48,4 MPa and 72,6 MPa. All the tests were performed in triplicate, totalizing 81 samples.

Keywords: Friability. Briquettes. Biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Material “A” antes do processo de briquetagem.....	20
Figura 02: Material “B” antes do processo de briquetagem.....	22
Figura 03: Material “C” antes do processo de briquetagem.....	22
Figura 04: Balança utilizada para medir 30g para compactação.....	23
Figura 05: Equipamento determinador da umidade dos materiais	24
Figura 06: Prensa hidráulica	25
Figura 07: Molde utilizado para a compactação da biomassa.....	26
Figura 08: Bomba calorimétrica determinante do poder calorífico	27
Figura 09: Balança utilizada para medir massa do ensaio de poder calorífico	28
Figura 10: Friabilômetro usado para teste de friabilidade	29
Figura 11: Concepção e objetivo dos testes de friabilidade realizados.....	30
Figura 12: Perfil dos materiais separados para o processo de briquetagem	32
Figura 13: Bagaço de cana acondicionado antes do processo de briquetagem	33
Figura 14: Prensa compactando molde com biomassa	34
Figura 15: Exemplo de aglomerado compactado de maior massa	35
Figura 16: Briquetes do material A produzidos com diferentes cargas de compressão	37
Figura 17: Briquetes do material B produzidos com diferentes cargas de compressão	38
Figura 18: Briquetes do material C produzidos com diferentes cargas de compressão	38
Figura 19: Briquetes de bagaço de cana com diferentes cargas de compressão	41
Figura 20: Briquetes do material B com diferentes cargas de compressão	43
Figura 21: Briquetes de Andiroba com diferentes cargas de compressão	46
Figura 22: Saída do programa Sanest - análise de variância	50
Figura 23: Saída do programa Sanest – teste de Tukey para madeira	50
Figura 24: Análise de variância da regressão (pressão)	51
Figura 25: Análise de variância da regressão (velocidade)	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Identificação das amostras	31
Tabela 02: Classificação das amostras após o teste de friabilidade	36
Tabela 03: Valores de umidade dos materiais pré-briquetagem	37
Tabela 04: Altura dos briquetes do material A com respectivas cargas de compressão	37
Tabela 05: Altura dos briquetes do material B com respectivas cargas de compressão	38
Tabela 06: Altura dos briquetes do material C com respectivas cargas de compressão	38
Tabela 07: Produção de briquetes em laboratório (em briquetes/hora)	40
Tabela 08: Valores das massas dos briquetes produzidos com o material A	41
Tabela 09: Valores das massas dos briquetes produzidos com o material B	43
Tabela 10: Valores das massas dos briquetes produzidos com o material C	46
Tabela 11: Resultados dos ensaios de poder calorífico dos diferentes materiais	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01: Altura dos briquetes (mm) x pressão de compactação (MPa)	39
Gráfico 02: Friabilidade x Pressão – Material A	42
Gráfico 03: Friabilidade x Pressão – Material B	44
Gráfico 04: Friabilidade x Pressão – Material C	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO ₂	Gás carbônico
GLP	Gás liquefeito de petróleo
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
ASTM	American Society For Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
LIMS	Laboratory Information Management Systems
LARBIO	Laboratório de Referência em Biocombustíveis
LCD	Liquid Cristal Display
RPM	Rotações Por Minuto
PCS	Poder Calorífico Superior

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivo específico	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Histórico do briquete	16
3.2	Conceitos de briquetagem	17
3.3	Principais vantagens da utilização de briquetes	18
3.4	Friabilidade	19
4	METODOLOGIA	20
4.1	Materiais	20
4.1.1	Bagaço de cana (material A)	20
4.1.2	Mistura de Andiroba, Pinus, Muiracatiara e Maçaranduba (material B)	21
4.1.3	Andiroba (material C)	22
4.1.4	Balança de precisão – Mark 1300	23
4.1.5	Medidor de umidade ID-200	24
4.1.6	Prensa hidráulica MPH-15	25
4.1.7	Molde para briquetagem	26
4.1.8	Bomba calorimétrica IKA C200	27
4.1.9	Balança Marte AY220	28
4.1.10	Friabilômetro	29
4.2	Métodos	30
4.2.1	Concepção dos testes envolvidos	30
4.2.2	Preparação dos materiais para o processo de briquetagem	32
4.2.2.1	Aquisição dos materiais	32
4.2.2.2	Separação dos materiais	32
4.2.2.3	Aferição da umidade dos materiais	33
4.2.3	Processo de briquetagem	34
4.2.4	Poder calorífico	34
4.2.5	Teste de friabilidade	35
4.3	Delineamento experimental	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37

5.1	Valores de umidade dos materiais	37
5.2	Altura dos briquetes	37
5.3	Processo de produção dos briquetes	40
5.4	Testes de friabilidade	41
5.4.1	Bagaço de cana (material A)	41
5.4.2	Mistura de Andiroba, Pinus, Muiracatiara e Maçaranduba (material B)	43
5.4.3	Andiroba (material C)	46
5.5	Poder calorífico	49
5.6	Delineamento experimental	50
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

O atual contexto do desenvolvimento científico e tecnológico tem alguns elementos muito importantes: a busca de novas tecnologias e a meta global de transição para uma economia sustentável, baseada em recursos renováveis. As tecnologias em questão são as nanotecnologias, biotecnologias e tecnologias de informação, que estão contribuindo para um avanço contínuo e acelerado na introdução de novos materiais funcionais e estruturais. O contexto da transição para a sustentabilidade teve como principal determinante a necessidade ou o interesse estratégico de se substituir petróleo por outras matérias-primas (GALEMBECK, 2009).

A busca por novas alternativas para a geração de energia tem se intensificado na comunidade científica. No Brasil, os investimentos para produção de energia não acompanharam a evolução da demanda, portanto, a pesquisa sobre diferentes opções de geração adicional de energia possui importância singular. Diante deste contexto, houve um aumento no interesse do uso dos resíduos de biomassa como fonte de energia, visando à substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis segundo Carvalho e colaboradores (2010 *apud* ZANELA, 2016).

A biomassa vegetal é um produto direto da fotossíntese, por meio da qual o gás carbônico (CO₂) é convertido em açúcares, os quais, posteriormente, são convertidos nos polímeros estruturais amido, celulose, hemicelulose e lignina. O aproveitamento energético e químico da biomassa se dá por meio de plataformas tecnológicas complexas, do tipo de matéria-prima e da eficiência adequada dos processos de conversão. (SANTANA *et al.*, 2013)

O processo de briquetagem, que consiste na trituração, secagem e compactação dos resíduos, é um método de reciclagem que gera como produto o briquete, que é uma fonte de produção de energia. Além de resíduos de madeira e carvão, outros materiais podem ser utilizados, como a casca de arroz, palha de milho, casca de coco babaçu, bagaço de cana, dentre outros (SANT'ANNA *et al.*, 2012).

Como benefício socioambiental advindo do processo produtivo de briquetes, cita-se o caso da cidade de Tejuçuoca no Ceará, que virou notícia em função do desenvolvimento do projeto “Coração Verde” que ajuda na conscientização de trabalhadores do campo para que eles não desmatem para produção de carvão vegetal.

Esse município ganhou visibilidade também por ser o berço da primeira unidade de fabricação de briquetes do Norte e Nordeste. O desenvolvimento de todo esse projeto trouxe diversos benefícios para a população, que, em vez de obter na produção clandestina de carvão vegetal a principal fonte de renda, passou a produzir briquetes. (DANTAS, 2012)

Alguns testes são realizados, tanto na matéria-prima (pré-processamento) quanto no material em que foi realizado o processo de briquetagem, para análise de conformidade com padrões, por exemplo, de poder calorífico, análise de voláteis e cinzas, carbono fixo e friabilidade.

Como parte importante desse processo produtivo, os testes de friabilidade são feitos para analisar a perda de massa do briquete quando o mesmo é submetido a choques (abrasão), o que simula seu transporte em esteiras ao longo do processo de fabricação. O foco do presente trabalho foi analisar a resistência mecânica (friabilidade) de briquetes de diferentes materiais utilizando um friabilômetro.

A produção em laboratório visa aperfeiçoar parâmetros de fabricação e torná-los escaláveis para produção industrial. A análise dos resultados desses testes auxilia nos ajustes dos parâmetros de fabricação, objetivando a produção e distribuição de uma biomassa de maior qualidade.

Foram produzidos 81 briquetes de 03 (três) materiais diferentes para a realização de testes de friabilidade. Cada material teve 27 briquetes que foram compactados com pressões de 24,2 MPa, 48,4MPa e 72,6 MPa, gerando 09 (nove) briquetes para cada força de compressão. Esses briquetes foram divididos em 03 (três) grupos, nos quais foram variadas as velocidades no teste de friabilidade 10 rpm, 25 rpm e 50 rpm. A mesma divisão foi feita para os outros dois materiais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estudar o parâmetro friabilidade em briquetes de biomassa, bagaço de cana, mistura de quatro espécies (Andiroba, Muiracatiara, Maçaranduba e Pinus) e Andiroba (*in natura*), produzidos em laboratório, utilizando um friabilômetro.

2.2. Objetivos específicos

- Preparação dos briquetes;
- Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) dos briquetes produzidos;
- Comparação dos resultados dos testes de friabilidade dos briquetes;
- Análise da influência das diferentes cargas de compressão na produção dos briquetes frente ao resultado de friabilidade;
- Análise da influência das diferentes velocidades de rotação do ensaio no friabilômetro.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Histórico do briquete

Em 1848, nos Estados Unidos, William Easby patenteou um método que convertia carvões com dimensões reduzidas em torrões sólidos por meio da pressão. Depois de 14 anos da patente de Easby, a palavra briquete surgiu na cidade de Paris, na França, sendo uma mistura de turfa (matéria orgânica geralmente encontrada em regiões pantanosas), água e argila plástica, conforme Carvalho e Brinck (2004).

Segundo Carvalho e Brinck (2004), na década de 1960 surgiram as primeiras iniciativas de utilização desse processo no Brasil, na Companhia Siderúrgica Belgo Mineiro do estado de Minas Gerais, com a instalação de um equipamento da empresa alemã Humboldt.

Analisando o uso e a produção do briquete no Brasil, percebe-se que o país possui uma tendência natural à produção desse biocombustível, porém ele não é muito conhecido atualmente. Apesar disso, sua demanda cresce cerca de 4% ao ano, devido à vantajosa substituição de fontes energéticas como a hidrelétrica, o óleo diesel, o GLP e o óleo combustível. Para Vicente (2009 *apud* DANTAS, 2012) a substituição de outro combustível pelo briquete é mais vantajosa nas atividades ligadas aos setores alimentícios com grande disponibilidade de resíduos orgânicos em seus processos de produção, onde, no Brasil, a produção do briquete vem se desenvolvendo mais.

Na região nordeste do Brasil a matéria-prima para fabricação do briquete é escassa e o valor do frete é elevado, porém para que fosse possível usar o biocombustível de forma a trazer benefícios para a região, optou-se por usar o briquete feito a partir do bagaço de cana, já que nesta região existe uma grande quantidade desse resíduo orgânico. Esse tipo de briquete é de qualidade inferior a outros feitos com outras matérias-primas, como a madeira de lei e resíduos de *pinus sp*, mas mesmo assim o produto soluciona a crescente demanda por essa modalidade de energia, originando bons resultados. (DANTAS, 2012)

3.2 Conceitos de briquetagem

A briquetagem consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior. O processo exige bons conhecimentos sobre as forças coesivas entre os sólidos, adesividade do ligante, comportamento do conjunto partícula-ligante e, fundamentalmente, propriedades físicas das partículas, química de superfície e mudanças físicas e químicas durante o processo de aquecimento (QUIRINO, 1991).

Para LIPPEL (2014), a briquetagem é um processo de densificação de resíduos. Todo resíduo de origem vegetal pode ser compactado pela briquetagem, bastando atender às necessidades de granulometria e teor de umidade exigido pelo processo. Esse processo possui a vantagem de transformar um resíduo de baixíssima densidade em uma lenha de alta qualidade.

Existem dois tipos de briquete: o simples e o composto. O simples é produzido a partir de apenas um tipo de matéria-prima. Já o briquete composto resulta da união de diversos resíduos de biomassa, evitando assim a dependência de apenas uma fonte de produção. Nos períodos de escassez dos resíduos de maior poder calorífico, por exemplo, tem-se a opção de substituí-los por outros resíduos em maior quantidade, mantendo a eficiência energética dos briquetes. (DANTAS, 2012)

O controle do teor de umidade da biomassa na compactação é um fator muito importante, uma vez que influenciará a qualidade do briquete, segundo Quirino (2000) o valor ideal de umidade se encontra entre 8% e 12%. Segundo Dias *et al.* (2012), a gelatinização do amido, a fragmentação de proteínas ou a solubilização de fibras na briquetagem é facilitada pela água presente na biomassa a ser compactada, no entanto, valores acima de 15% podem provocar a quebra do briquete ou a degradação biológica no transporte ou armazenamento. (VALE, 2017).

3.3 Principais vantagens da utilização de briquetes

Segundo LIPPEL (2017), a biomassa tem suas vantagens, tendo como exemplo a qualidade na geração de calor. Outra vantagem da energia provida da biomassa é grande parte vem de resquícios agrícolas, que antes não eram aproveitados e sim descartados e queimados, que é o caso da casca de arroz, de café, bagaço de cana e muitos outros resíduos. Assim como madeiras de reflorestamento, como eucalipto e pinus. Na Europa, em volta de 50% da energia renovável, é vinda da biomassa, pois essa energia possui uma importante posição na geração de energias renováveis.

No Brasil, existe um grande potencial para a produção de briquetes. Para a safra 2015/2016, o Brasil produziu 665,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, das quais 367,6 milhões de toneladas foram produzidas no estado de São Paulo. Considerando-se que cada tonelada de cana-de-açúcar colhida possui em torno de 140kg de palha, cerca de 93,19 milhões de toneladas foram geradas nessa safra (PADILLA, 2016).

Além de ser um combustível renovável o briquete apresenta as seguintes vantagens: é de fácil manuseio e armazenamento, pouca produção de fumaça, cinza e fuligem (comparado ao carvão vegetal), não é um produto sazonal, é legalizado pelo IBAMA (totalmente reciclado), não precisa de monocultura, utiliza de mão de obra humana e tecnológica, atingido vários campos de trabalho, é bastante praticado em territórios com escassez de terrenos e de árvores, pois utiliza restos de biomassa, pelo fato de não desmatar, não provoca erosão do solo e não influi na sua esterilidade e corrobora com o “marketing verde”.

3.4 Friabilidade

Testes de friabilidade em briquetes de biomassa, comumente denominados testes de tamboreamento, vêm sendo realizados com o auxílio de friabilômetros similares aos que são usados pela indústria farmacêutica. O propósito dos testes é o mesmo: indicar a friabilidade de produtos desenvolvidos. Com a elevação da demanda pelo produto, pesquisas envolvendo a fabricação de briquetes de biomassa vêm aumentando e a padronização de uma metodologia de ensaio para esse importante parâmetro do produto final se mostra de fundamental importância para a caracterização, estudo e melhoria contínua do processo de fabricação.

O meio farmacêutico utiliza o teste de friabilidade com o fito de avaliar a integridade dos comprimidos durante o processo de produção, que envolvem acondicionamento, revestimento, envelopamento, emblistagem e transporte. O teste envolve a prévia pesagem dos comprimidos, a submissão à atuação do aparelho, a retirada da parte que foi descompactada e a pesagem da massa compactada restante após o teste. O percentual de massa perdida corresponde à friabilidade do comprimido. O friabilômetro é composto por um cilindro - onde são acondicionados os comprimidos que serão testados - que gira em torno do próprio eixo a 25 rpm. O número de voltas corresponde ao número de quedas as quais os objetos testados serão submetidos (DCTECH, 2017).

4. METODOLOGIA

4.1. Materiais

Os materiais foram identificados como bagaço de cana (material A), mistura de quatro espécies - Andiroba, Muiracatiara, Maçaranduba e *pinus sp* - (material B) e Andiroba – *in natura* – (material C)

4.1.1. Bagaço de cana

A cana-de-açúcar, originária da espécie *Saccharum officinarum*, é um exemplo de cultura renovável e versátil, que pode ser utilizada como fonte de energia limpa e matéria-prima de produtos. O Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. A modernização das 430 usinas em operação no país, com a adoção de novas tecnologias desde o plantio até a produção de açúcar, etanol e bioeletricidade, fortaleceram o setor, reconhecido mundialmente por seu pioneirismo e sua eficiência produtiva (BRASKEM, 2017). Na figura 01 está apresentado o material “A”, utilizado no processo de briquetagem.

Figura 01 - Material “A” antes do processo de briquetagem.



Fonte: próprio autor.

4.1.2. Mistura de Andiroba, Muiracatiara, Maçaranduba e *pinus sp*

O material foi adquirido em uma madeireira de pequeno porte, por proporcionar à madeireira uma nova forma de reuso dos rejeitos. O proprietário, que antes vendia seus rejeitos para granjas – que se utilizavam desse recurso para fazer a forragem para acomodar os filhotes -, está perdendo espaço para novos materiais que estão sendo utilizados na acomodação das aves.

O material classificado como “B”, nesse trabalho, é uma mistura de quatro espécies de madeira, em que as porcentagens de mistura não puderam ser quantificadas por conta do local onde foram coletados não proporcionar essa condição.

A madeira Andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.), sendo de boa aparência e boa trabalhabilidade, moderadamente pesada, média resistência mecânica, é particularmente indicada para construção de barcos e navios (acabamentos e ornamentação), carpintaria e construção, assoalhos, marcenaria e mobília, acabamento e ornamentação de interiores, moinhos, torneamento, lâminas e compensados (uso geral), contraplacados, móveis, bem como para aplicações internas em construção civil. (MADEIREIRA CACIQUE, 2017)

A madeira de pinus (*pinus elliottii*) é comumente utilizada nas construções. É também conhecida pelos nomes populares de pinheiro e pinheiro americano. O pinus é classificado como uma madeira “softwood”, pertencente ao grupo de coníferas. Madeira de reflorestamento, o pinus foi introduzido com sucesso no Brasil nos anos 70, proveniente da América do Norte. No Brasil, as árvores ocorrem em diversos estados, principalmente nas regiões Sul e Sudeste (GLOBALWOOD, 2017).

A madeira Muiracatiara (*Astronium lecointei* Ducke) é utilizada para construção leve. Recomendada para fabricação de vigas, caibros, ripas, molduras, cordões, rodapés, caixilhos, marcos de porta, janelas, paredes divisórias, venezianas, forros, assoalho, tacos, painéis, lâminas faqueadas decorativas, móveis, objetos de adorno, puxadores, formas para calçados, barris, tonéis e implementos agrícolas (A MATA BRASIL, 2017).

A madeira de Maçaranduba (*Manilkara spp.*) por ser muito pesada, de resistência mecânica alta e ter boa durabilidade natural, é indicada para construção de estruturas

externas, dormentes, postes, estacas, mourões, cruzetas etc.; em construção civil, como vigas, caibros, tábuas e tacos para assoalhos (MADEIREIRA AVARE, 2017). Na figura 02 está apresentado o material “B”, utilizado no processo de briquetagem.

Figura 02 - Material “B” antes do processo de briquetagem.



Fonte: próprio autor.

4.1.3. Andiroba (*in natura*)

Esse material foi previamente descrito no tópico 4.1.2. Na figura 03, está apresentado o material “C”, utilizado no processo de briquetagem.

Figura 03 - Material “C” antes do processo de briquetagem.



Fonte: próprio autor.

4.1.4. Balança – Mark 1300

Balança utilizada para pesar massas de 30 g das amostras submetidas ao processo de briquetagem. A balança possui as características listadas a seguir e é ilustrada na figura 04.

- Capacidade: 1300,00 g;
- Leitura: 0,1 mg;
- Repetitividade: 0,005 g;
- Coeficiente de sensibilidade a temperatura: +/- 4 ppm/°C (10-30 °C);
- Diâmetro do prato: 160 mm;

Figura 04: Balança utilizada para pesar 30 g para compactação.



Fonte: próprio autor

4.1.5. Medidor de umidade ID-200

Medidor de umidade com fonte de calor infravermelho produzido por resistência encapsulada em quartzo e display LCD matriz de pontos iluminados. Apresenta resultado de secagem em: sólido/total, líquido/total ou líquido/sólido. O programa de secagem utilizado no presente trabalho foi o “Normal”, onde a amostra é seca em um determinado período a uma temperatura determinada. Na figura 05 está apresentado o medidor de umidade utilizado na determinação da umidade dos materiais.

Figura 05 - Equipamento determinador da umidade dos materiais.



Fonte: próprio autor.

4.1.6. Prensa hidráulica MPH-15

Prensa hidráulica, com acionamento manual, utilizada para compactar o molde onde estavam contidos os materiais submetidos ao processo de briquetagem. A prensa possui, como capacidade máxima de compressão, 15 toneladas. A figura 06 mostra a prensa hidráulica utilizada no processo de briquetagem.

Figura 06 - Prensa hidráulica.



Fonte: próprio autor

4.1.7. Molde para briquetagem

Molde de compactação dos materiais para o processo de briquetagem foi confeccionado em aço inoxidável. O molde é composto por três partes: pistão (a), base (b) e tubo (c). A figura 07 mostra o molde em aço inoxidável utilizado no processo de briquetagem.

Dimensões do pistão (a):

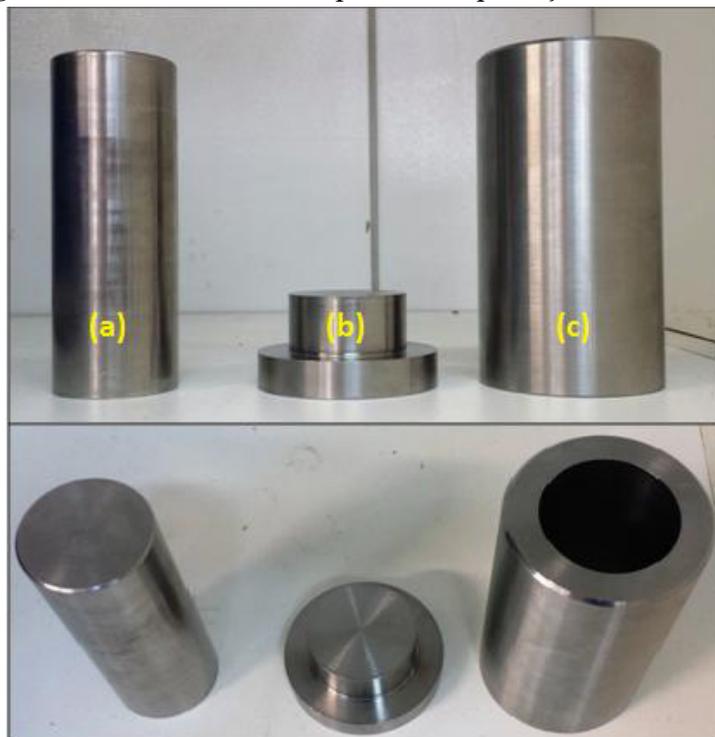
- Diâmetro: 50 mm
- Comprimento: 100 mm

Dimensões da base (b): consiste em um cilindro escalonado, com diâmetros de 50 mm (comprimento de 25 mm) e 75mm (comprimento de 15 mm).

Dimensões do tubo (c):

- Furo: 50 mm
- Diâmetro externo: 75 mm
- Comprimento: 140 mm

Figura 07 - Molde utilizado para a compactação da biomassa.



Fonte: próprio autor.

4.1.8. Bomba Calorimétrica IKA C200

A bomba calorimétrica C-200 foi utilizada para a determinação do poder calorífico. Contempla as normas internacionais, tais como: DIN 51900, BS 1016 parte S 1077, ASTM D 5865, ASTM D 240-87, ASTM E711-87, ISO 1928-1976, ASTM D1989-91 e BSI. Faixa de medição 9560 cal, máximo 40.000 J, ideal para poder calorífico superior (PCS). (LABCONTROL, 2017). A figura 08 mostra a bomba calorimétrica utilizada no processo de determinação do poder calorífico dos materiais.

Figura 08 - Bomba calorimétrica determinante do poder calorífico superior.



Fonte: próprio autor

4.1.9. Balança – Marte AY220

Balança utilizada para pesar massas entre 0,5 – 1,0 g das amostras submetidas ao ensaio para determinação do poder calorífico superior dos materiais. A balança possui as características listadas a seguir e ilustrada na figura 09.

Balança analítica - 0,0001 g - AY220:

- Capacidade: 220 g;
- Leitura: 0,1 mg;
- Repetitividade: 0,1 mg;
- Linearidade: +/-0,2 mg;
- Temperatura de operação: 5-40°C;
- Coeficiente de sensibilidade a temperatura: +/- 2 ppm/°C (10-30 °C);
- Diâmetro do prato: 80 mm;

Figura 09 - Balança utilizada para medir massa do ensaio de poder calorífico.



Fonte: próprio autor.

4.1.10. Friabilômetro

O friabilômetro, desenvolvido por Aguiar (2017), foi utilizado para a realização dos testes de tamboreamento, onde os briquetes em análise são inseridos (figura 10) no interior do cilindro de acrílico que está conectado a um motor através de um eixo. O cilindro realiza voltas em torno do eixo submetendo o briquete aos choques. O equipamento possui uma interface de fácil utilização e como parâmetros operacionais a velocidade (rpm) e o número de voltas do ensaio. Esses parâmetros são ajustáveis e variam da seguinte forma:

- Velocidade: 0 – 99 rpm
- Número de voltas: 0 – 999 voltas

Figura 10 - Friabilômetro de bancada usado para teste de friabilidade.



Fonte: próprio autor.

4.2. Métodos

4.2.1. Concepção dos testes envolvidos

Com o objetivo de explorar o comportamento – quanto a resistência à abrasão e ao impacto - de três (03) biomassas de diferentes composições submetidas a três (03) níveis de cargas de compressão e testadas com três (03) diferentes velocidades de ensaio, foram mapeadas as amostras, sendo divididas, em ordem, pela carga de compressão (05 t, 10 t e 15 t), pelo material (A, B e C) e pela velocidade aplicada durante o teste (10 rpm, 25 rpm e 50 rpm). Todos os ensaios foram realizados em triplicata, totalizando 81 amostras ensaiadas. A figura 11 apresenta esboço geral do trabalho.

Figura 11 - Concepção e objetivo dos testes de friabilidade realizados.



Fonte: próprio autor.

As amostras foram identificadas, para melhor organização durante o trabalho, pela carga de compressão aplicada, material utilizado e velocidade do teste de friabilidade, sendo ilustradas na tabela 01 e identificadas da seguinte maneira:

Cargas de compressão: 5 t, 10 t e 15 t

Material: A (bagaço de cana), B (mistura) e C (*Andiroba in natura*)

Velocidade do teste: 10 rpm, 25 rpm e 50 rpm

Tabela 01 – Identificação das amostras.

AMOSTRAS			
A	5 A 10	10 A 10	15 A 10
	5 A 25	10 A 25	15 A 25
	5 A 50	10 A 50	15 A 50
B	5 B 10	10 B 10	15 B 10
	5 B 25	10 B 25	15 B 25
	5 B 50	10 B 50	15 B 50
C	5 C 10	10 C 10	15 C 10
	5 C 25	10 C 25	15 C 25
	5 C 50	10 C 50	15 C 50

Fonte: próprio autor

4.2.2. Preparação dos materiais para o processo de briquetagem

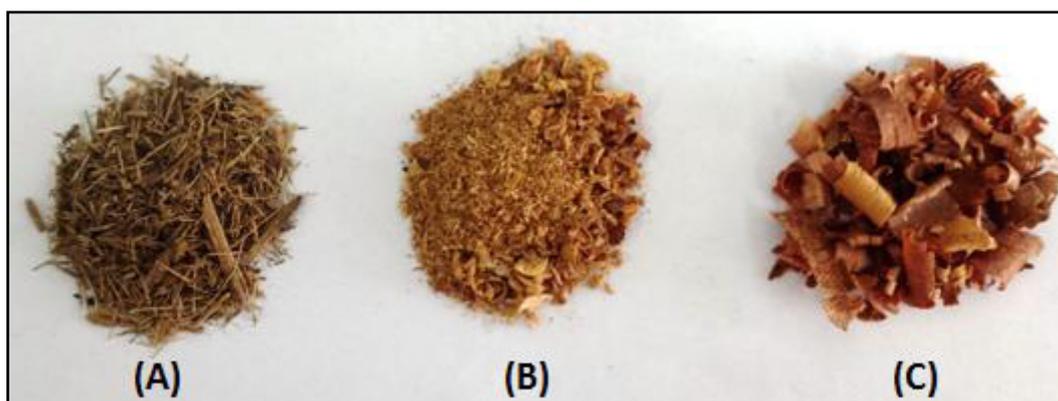
4.2.2.1. Aquisição dos materiais

O material bagaço de cana (A) foi cedido pelo Laboratório de Referência em Biocombustíveis (LARBIO), que foi coletada em uma fábrica produtora de cachaça (como rejeito do processo de produção), no município de Redenção – CE. Os outros dois materiais, mistura de quatro espécies de madeira (B) e a madeira de Andiroba (C), foram coletados em uma madeireira de pequeno porte, também como rejeitos dos processos inerentes às atividades da madeireira.

4.2.2.2. Separação dos materiais

A figura 12 apresenta o perfil dos três tipos de material, separados visualmente, para briquetagem.

Figura 12 - Perfil dos materiais separados para o processo de briquetagem.



Fonte: próprio autor.

Em seguida, 30 g de cada material foram acondicionados em sacolas plásticas de acordo com o número de amostras necessárias para a realização dos testes de friabilidade. A figura 13 apresenta a forma como as amostras de 30g foram acondicionadas antes do processo de briquetagem.

Figura 13 - Bagaço de cana acondicionado antes do processo de briquetagem.



Fonte: próprio autor.

4.2.2.3. Aferição da umidade dos materiais

Foram separados cinco (05) gramas de cada material para a verificação da umidade. O processo consiste em introduzir a massa no ambiente do medidor de umidade. Esse ambiente é equipado com uma balança de precisão e uma resistência que aquece a amostra, retirando a umidade contida. Após a estabilização da massa (indicando a completa retirada da umidade), chega-se à umidade – pela diferença de massa – que a amostra continha antes da aferição.

4.2.3. Processo de briquetagem

A briquetagem consistiu em acondicionar 30 g de material no molde de aço inoxidável e compactar a biomassa, variando as cargas de compactação em 05 toneladas (24,20 MPa), 10 toneladas (48,40 MPa) e 15 toneladas (72,60 MPa), com auxílio de uma prensa hidráulica de acionamento manual. Na figura 14 está apresentada a prensa hidráulica utilizada no processo de briquetagem.

Figura 14 - Prensa compactando molde com biomassa.



Fonte: próprio autor.

4.2.4. Poder calorífico

O objetivo do ensaio – realizado antes e depois do processo de briquetagem - é apresentar a diferença de poder calorífico, considerando o mesmo volume ocupado, obtido com a compactação da biomassa. Entretanto, o ensaio realizado no LARBIO utiliza valores para a massa das amostras ensaiadas de 0,5 – 1,0 g.

A biomassa é compactada em torno de quatro a cinco vezes. Com isso, ficou impossível obter o mesmo volume (pré e pós-briquetagem) com massas dentro do intervalo aceitável para o ensaio, visto que as massas antes e depois do processo de briquetagem refletem a compactação (de quatro a cinco vezes maior, após a briquetagem, para o mesmo volume ocupado).

Portanto, realizou-se o ensaio de poder calorífico para os materiais “B” e “C” antes e depois do processo de briquetagem fixando as massas dentro do valor exigido pelo ensaio. Os testes para o material “A” já haviam sido realizados e os valores catalogados. É importante ressaltar que os valores para o material “A” foram obtidos com material advindo da mesma matriz de bagaço de cana utilizado para a confecção dos briquetes deste trabalho.

4.2.5. Teste de friabilidade

As amostras foram pesadas antes e depois de serem submetidas à ação do equipamento. O aglomerado compactado de maior massa foi considerado o que restou do briquete após o teste de friabilidade. A figura 15 apresenta o pedaço aglomerado de maior massa após o teste de friabilidade.

Figura 15 - Exemplo de aglomerado compactado de maior massa.



Fonte: próprio autor.

A velocidade dos testes foi variada a fim de observar a influência do referido parâmetro nos resultados obtidos com o método utilizado.

Na tabela 02 está apresentada a classificação dos finos gerados pelo teste de friabilidade. Essa classificação foi sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais, para carvão vegetal, sendo citada por Oliveira e Almeida (1982).

Tabela 02: Classificação das amostras após o teste de friabilidade.

CLASSIFICAÇÃO	% PERDAS
Muito friável	≥ 30
Bastante friável	25 – 29
Friabilidade média	16 – 24
Pouco friável	11 – 15
Muito pouco friável	≤ 10

Fonte: próprio autor.

4.3 Delineamento experimental

No ensaio com vistas ao estudo do parâmetro friabilidade em briquetes de biomassa utilizaram-se três tipos de materiais (A, B e C), compactados em três níveis de pressões (24,2 MPa, 48,4MPa e 72,6 MPa) e submetidos a três velocidades no teste de friabilidade (10 rpm, 25 rpm e 50 rpm) com três repetições, num delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial.

As análises estatísticas foram realizadas de acordo com os critérios estabelecidos pela estatística experimental (Gomes, 1990). Nessas análises, utilizaram-se os programas de computação Sanest (Sistema de Análise Estatística), ESALQ-USP e Excel. Na análise da variância, os tratamentos foram comparados pelo teste F, considerando-se um nível mínimo de significância de 5% de probabilidade. As comparações entre médias para o tratamento qualitativo (tipo de materiais) foram realizadas pelo teste de Tukey em níveis de 5% e 1% de probabilidade e os ajustes estatísticos de regressão para os tratamentos quantitativos (pressões e velocidades) para os mesmos níveis de significância.

5. RESULTADOS

5.1. Valores de umidade dos materiais

Na tabela 03 estão apresentados os valores de umidade dos materiais utilizados durante o processo de briquetagem.

Tabela 03 - Valores de umidade dos materiais pré-briquetagem.

MATERIAL	UMIDADE (%)
A	10,3
B	11,4
C	10,8

Fonte: próprio autor.

5.2. Altura dos briquetes

Nas figuras 16, 17 e 18 estão apresentados os briquetes dos materiais A, B e C, respectivamente, com as diferentes cargas de compressão. Nas tabelas 04, 05 e 06 estão apresentados os valores de altura, em milímetros, dos materiais com as respectivas cargas de compressão.

Figura 16 - Briquetes do material A produzidos com diferentes cargas de compressão.



Fonte: próprio autor.

Tabela 04 - Altura dos briquetes do material A com respectivas cargas de compressão.

MATERIAL A	ALTURA (mm)
24,2 MPa	22,40
48,4 MPa	17,44
72,6 MPa	15,70

Fonte: próprio autor.

Figura 17 - Briquetes do material B produzidos com diferentes cargas de compressão.



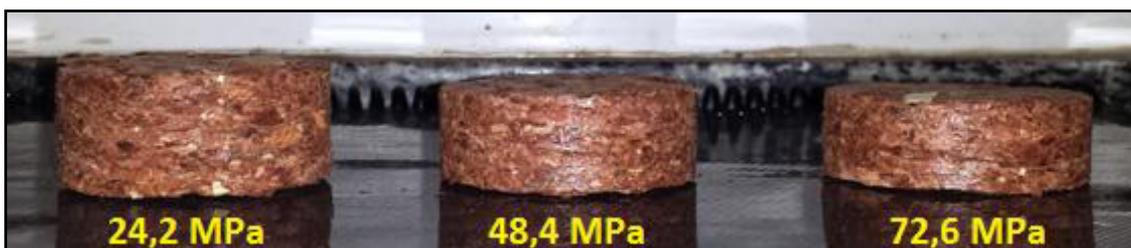
Fonte: próprio autor

Tabela 05 - Altura dos briquetes do material B com respectivas cargas de compressão.

MATERIAL B	ALTURA (mm)
24,2 MPa	23,22
48,4 MPa	18,34
72,6 MPa	16,80

Fonte: próprio autor.

Figura 18 - Briquetes do material C produzidos com diferentes cargas de compressão.



Fonte: próprio autor.

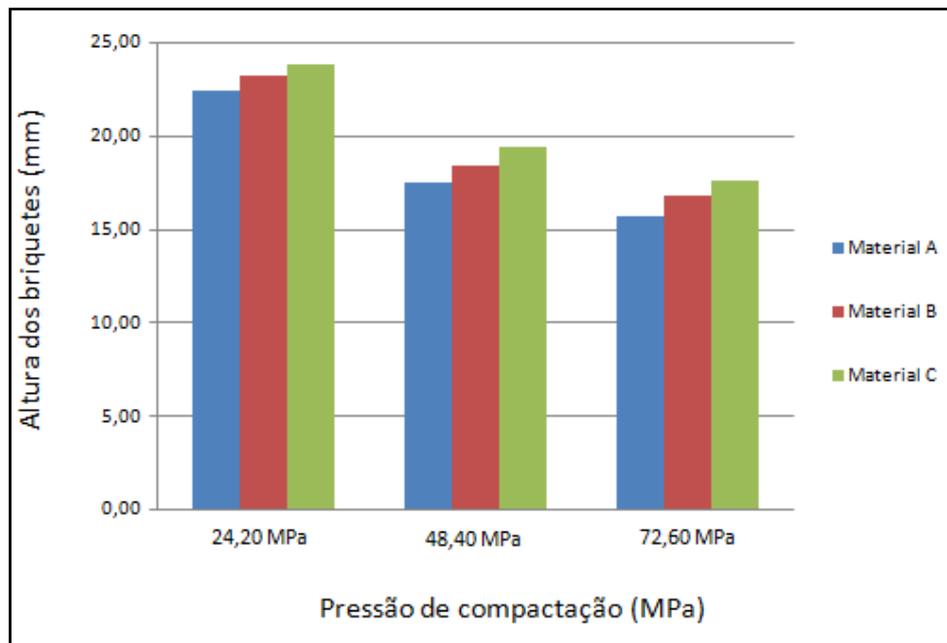
Tabela 06 - Altura dos briquetes do material C com respectivas cargas de compressão.

MATERIAL C	ALTURA (mm)
24,2 MPa	23,76
48,4 MPa	19,42
72,6 MPa	17,56

Fonte: próprio autor.

No gráfico 01 estão apresentados valores de altura dos briquetes, considerando o tipo de material e as pressões de compactação.

Gráfico 01 - Altura dos briquetes (mm) x pressão de compactação (MPa)



Fonte: próprio autor.

5.3. Processo de produção dos briquetes

A quantidade de briquetes produzidos em laboratório, da introdução dos 30 g separados previamente até a retirada do briquete do molde, foi contabilizada e os dados encontram-se na tabela 07.

Tabela 07 - Produção de briquetes em laboratório (em briquetes/hora).

MATERIAL	PRODUÇÃO (briquete/hora)
A	09
B	18
C	20

Fonte: próprio autor.

O processo de separação em amostras de 30 g antes do material ser comprimido foi mais difícil para o material A (bagaço de cana), visto que a classificação, ainda que somente visual, passava por um material com certa heterogeneidade, indo de pó até pedaços bem grosseiros. Portanto, para a separação de um material minimamente homogêneo foi investido o maior tempo dentre os três materiais.

Durante a introdução dos 30 g, previamente separados, no molde de aço inoxidável para posterior compressão, o material que apresentou maior dificuldade de passar pelo funil que auxiliou o processo e, conseqüentemente, promoveu o maior gasto de tempo foi o material A (bagaço de cana).

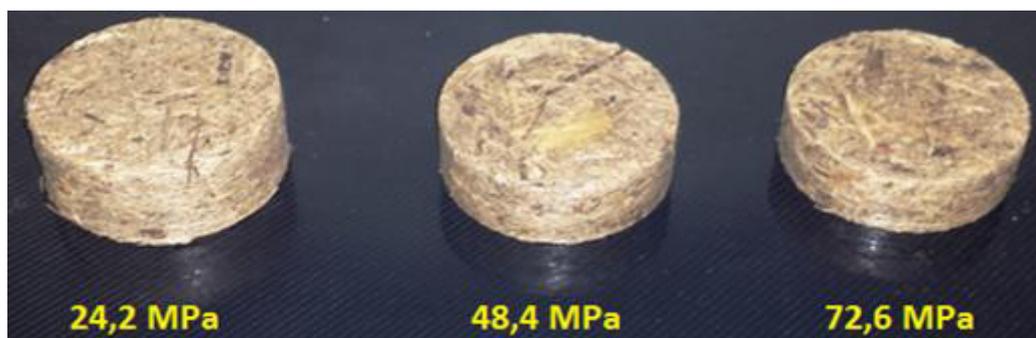
Os outros dois materiais, B e C, apresentaram tempos parecidos durante a introdução das amostras separadas no molde, gerando uma produção semelhante.

5.4. Testes de friabilidade

5.4.1. Bagaço de cana (material A)

Na figura 19 estão apresentados os briquetes do material A produzidos com as diferentes cargas de compactação.

Figura 19 - Briquetes de bagaço de cana com diferentes cargas de compressão.



Fonte: próprio autor.

Na tabela 08 estão apresentadas as massas dos briquetes de bagaço de cana.

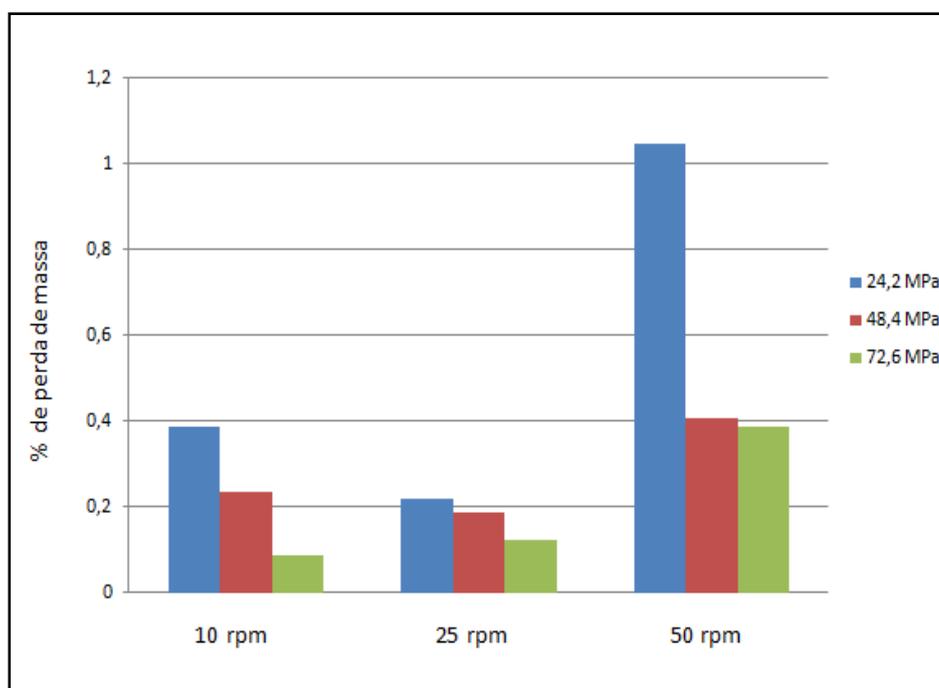
Tabela 08 - Valores das massas dos briquetes produzidos com o material A.

AMOSTRAS "A"	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	% PERDA	% PERDA MÉDIA	CLASSIFICAÇÃO
5 A 10	30,14	29,98	0,530856005	0,389113753	Muito Pouco Friavel
5 A 10	29,92	29,83	0,300802139		Muito Pouco Friavel
5 A 10	29,79	29,69	0,335683115		Muito Pouco Friavel
5 A 25	30,08	30,03	0,166223404	0,220861723	Muito Pouco Friavel
5 A 25	30,30	30,25	0,165016502		Muito Pouco Friavel
5 A 25	30,18	30,08	0,331345262		Muito Pouco Friavel
5 A 50	29,93	29,64	0,968927497	1,048892844	Muito Pouco Friavel
5 A 50	30,28	29,97	1,023778071		Muito Pouco Friavel
5 A 50	30,33	29,98	1,153972964		Muito Pouco Friavel
10 A 10	29,95	29,86	0,300500835	0,235283064	Muito Pouco Friavel
10 A 10	29,60	29,53	0,236486486		Muito Pouco Friavel
10 A 10	29,61	29,56	0,168861871		Muito Pouco Friavel
10 A 25	30,42	30,37	0,164365549	0,189440954	Muito Pouco Friavel
10 A 25	30,05	29,99	0,199667221		Muito Pouco Friavel
10 A 25	29,37	29,31	0,204290092		Muito Pouco Friavel
10 A 50	30,11	29,98	0,431750249	0,409257737	Muito Pouco Friavel
10 A 50	30,22	30,12	0,330906684		Muito Pouco Friavel
10 A 50	30,10	29,96	0,465116279		Muito Pouco Friavel
15 A 10	29,91	29,89	0,066867268	0,088941267	Muito Pouco Friavel
15 A 10	29,96	29,92	0,133511348		Muito Pouco Friavel
15 A 10	30,10	30,08	0,066445183		Muito Pouco Friavel
15 A 25	29,85	29,80	0,167504188	0,123043773	Muito Pouco Friavel
15 A 25	30,01	29,98	0,099966678		Muito Pouco Friavel
15 A 25	29,51	29,48	0,101660454		Muito Pouco Friavel
15 A 50	30,05	29,96	0,299500832	0,386953143	Muito Pouco Friavel
15 A 50	30,23	30,06	0,562355276		Muito Pouco Friavel
15 A 50	30,10	30,01	0,299003322		Muito Pouco Friavel

Fonte: próprio autor.

Os briquetes constituídos do material A (bagaço de cana) foram os que apresentaram menor perda de massa dentre os três materiais testados. O fator de maior influência para esse comportamento foi, provavelmente, o perfil alongado e fino da matéria-prima, que proporciona maior entrelaçamento das fibras. No gráfico 02 estão contidos os resultados de friabilidade x pressão do material “A”.

Gráfico 02 – Friabilidade x Pressão – Material A



Fonte: Próprio autor

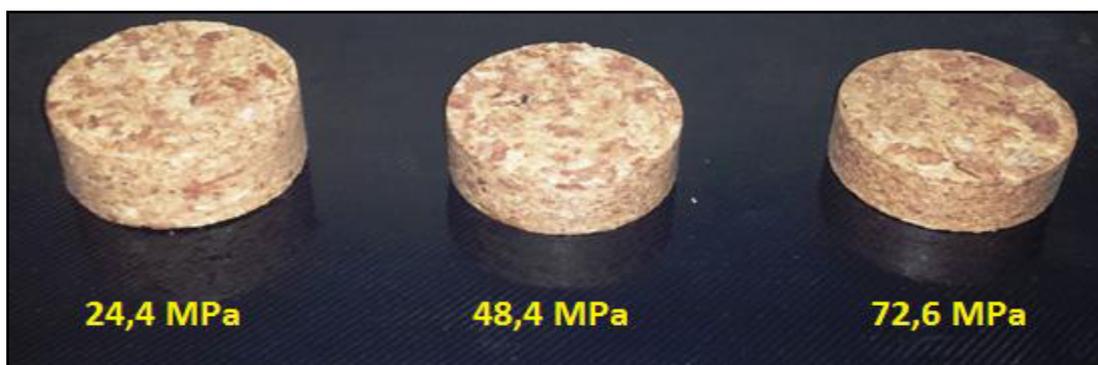
Os testes realizados no material A foram, ainda, os que apresentaram os resultados mais aproximados, considerando-se a melhor e a pior condição de teste, 15 a 10 e 5 a 50, com os valores de perda percentual de 0,066% e 1,154% respectivamente, sendo todos classificados como muito pouco friáveis.

Em se tratando estritamente da perda de massa, os briquetes de bagaço de cana se mostraram praticamente indiferentes, no que tange às cargas de compressão aplicadas e ao tipo de teste aplicado nesse trabalho.

5.4.2. Mistura de Andiroba, *pinus sp*, Muiracatiara e Maçaranduba (material B)

Na figura 20 estão apresentados os briquetes do material B com as cargas de compactação.

Figura 20 - Briquetes do material B com diferentes cargas de compressão.



Fonte: próprio autor.

Na tabela 09 estão apresentadas as massas dos briquetes produzidos com a mistura das quatro (04) espécies: Andiroba, Pinus, Muiracatiara e Maçaranduba.

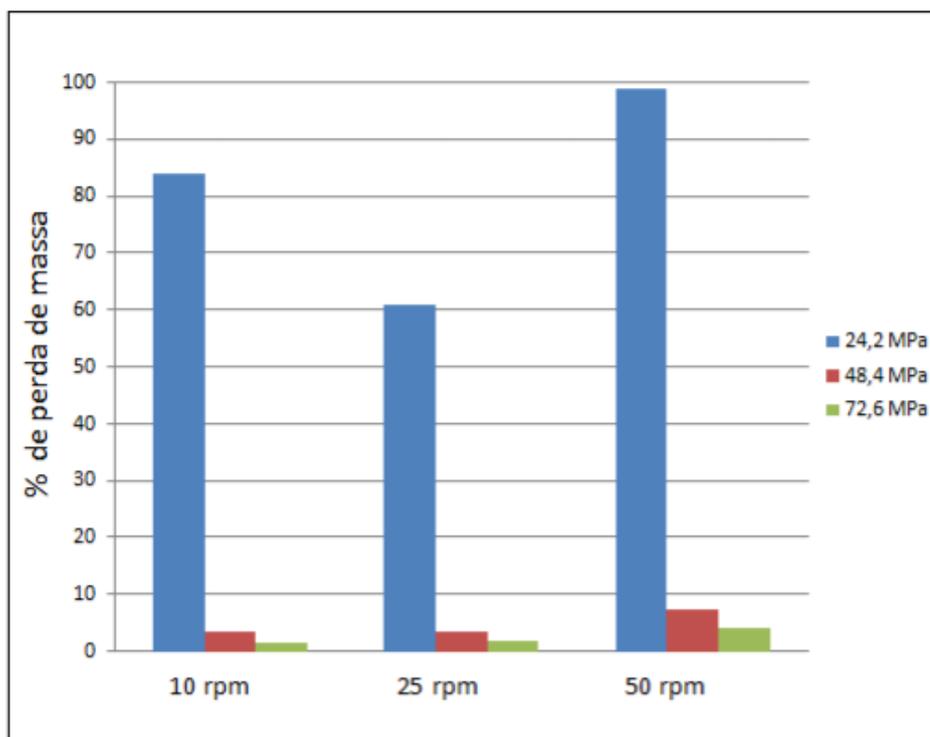
Tabela 09 - Valores das massas dos briquetes produzidos com o material B.

AMOSTRAS "B"	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	% PERDA	% PERDA MÉDIA	CLASSIFICAÇÃO
5 B 10	29,52	0,93	96,8495935	83,94695264	Muito Friável
5 B 10	30,04	2,49	91,71105193		Muito Friável
5 B 10	30,12	11,06	63,28021248		Muito Friável
5 B 25	30,27	7,55	75,05781302	60,96350786	Muito Friável
5 B 25	29,82	3,75	87,42454728		Muito Friável
5 B 25	29,89	23,79	20,40816327		Friabilidade Média
5 B 50	29,76	0,25	99,15994624	98,97390291	Muito Friável
5 B 50	30,14	0,21	99,30325149		Muito Friável
5 B 50	30,49	0,47	98,45851099		Muito Friável
10 B 10	29,82	28,78	3,48759222	3,545162201	Muito Pouco Friável
10 B 10	30,05	28,82	4,093178037		Muito Pouco Friável
10 B 10	29,79	28,88	3,054716348		Muito Pouco Friável
10 B 25	30,49	29,07	4,657264677	3,521715252	Muito Pouco Friável
10 B 25	30,20	29,18	3,377483444		Muito Pouco Friável
10 B 25	30,43	29,66	2,530397634		Muito Pouco Friável
10 B 50	30,06	27,64	8,050565536	7,409811315	Muito Pouco Friável
10 B 50	30,32	28,53	5,903693931		Muito Pouco Friável
10 B 50	30,09	27,60	8,275174477		Muito Pouco Friável
15 B 10	29,80	29,34	1,543624161	1,43385163	Muito Pouco Friável
15 B 10	30,22	29,86	1,191264064		Muito Pouco Friável
15 B 10	30,00	29,53	1,566666667		Muito Pouco Friável
15 B 25	30,18	29,66	1,722995361	1,85972826	Muito Pouco Friável
15 B 25	30,18	29,62	1,855533466		Muito Pouco Friável
15 B 25	30,49	29,88	2,000655953		Muito Pouco Friável
15 B 50	30,28	29,10	3,896961691	4,11047705	Muito Pouco Friável
15 B 50	30,10	28,79	4,352159468		Muito Pouco Friável
15 B 50	30,13	28,90	4,08230999		Muito Pouco Friável

Fonte: próprio autor.

Os briquetes feitos com o material B (mistura de quatro espécies de madeira) apresentaram uma perda de massa parecida, se consideradas as pressões de 48,4 e 72,6 MPa. Nesses dois níveis de carga de compactação, o maior e o menor percentual de perda de massa obtidos foram 8,275% e 1,191%, respectivamente, sendo todos classificados como muito pouco friáveis. No gráfico 03 estão apresentados valores friabilidade x pressão de compactação para o material “B”.

Gráfico 03 – Friabilidade x Pressão – Material B



Fonte: Próprio autor

Os briquetes produzidos com a compressão de 24,2 MPa apresentaram resultados insatisfatórios de perda de massa, com valores percentuais médios de perda de massa de 83,947% (10 rpm), 60,963% (25 rpm) e 98,974% (50rpm), sendo todos classificados como muito friáveis.

Ressalta-se a média dos testes, que foram realizados em triplicata, referente aos testes com 25 rpm (60,963%). Os valores de 10 e 25 rpm são, geralmente, parecidos para todos os materiais. Um dos três testes 5 B 25 teve apenas 20,408% de perda, valor baixo comparado com os outros da mesma condição (75,058% e 87,424%).

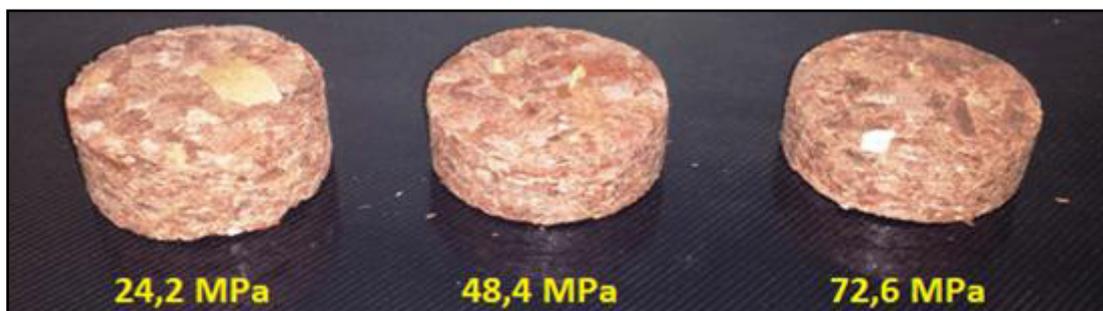
Atribui-se a esse baixo valor de perda de massa, que acabou tornando a média da triplicata baixa, a maior heterogeneidade do material B, tanto das quatro composições químicas, quanto dos perfis dessas composições, ora um fino pó, ora granulados um pouco maiores.

Segundo Gonçalves (2013), esse resultado é atribuído à diferença granulométrica encontrada nessa amostra, pois os espaços entre as partículas grandes, previamente ocupados por ar, passaram a ser preenchidos com as partículas de tamanho menor, o que garante uma maior adesão entre as partículas (GONÇALVES, 2013).

5.4.3. Andiroba (material C)

Na figura 21 estão apresentados os briquetes do material C produzidos com as diferentes cargas de compactação.

Figura 21 - Briquetes de Andiroba com diferentes cargas de compressão.



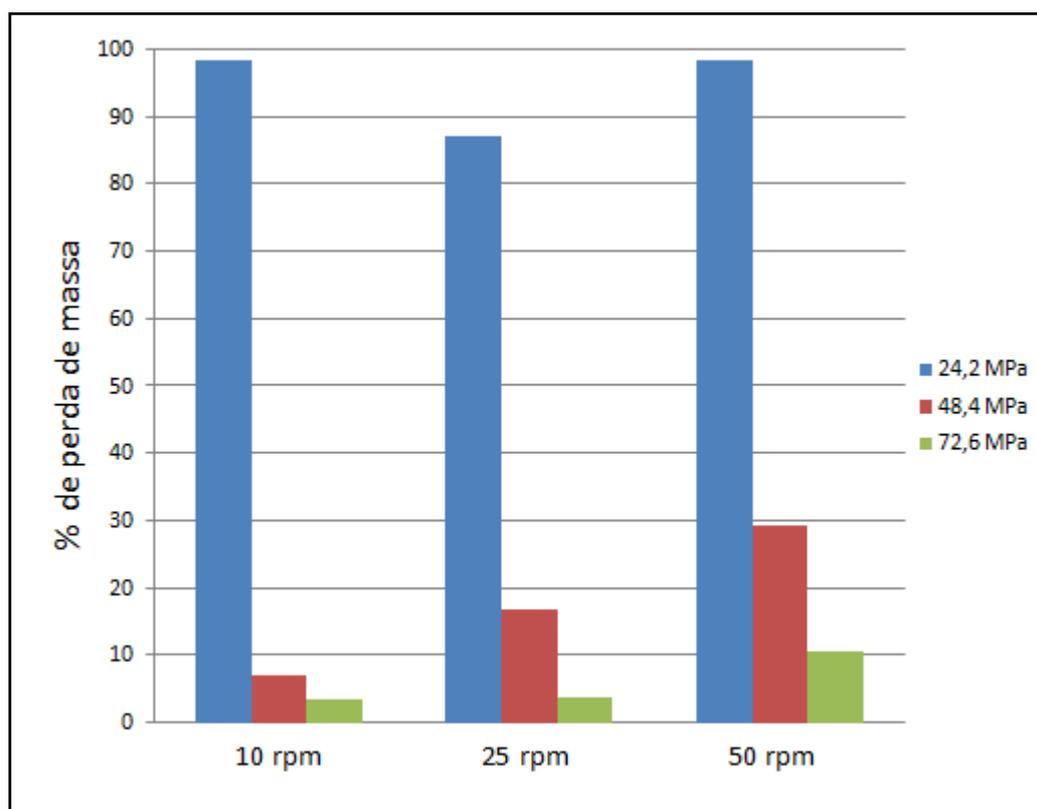
Fonte: próprio autor.

Na tabela 10 estão apresentadas as massas dos briquetes da madeira Andiroba.

Tabela 10 - Valores das massas dos briquetes produzidos com o material C.

AMOSTRAS "C"	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	% PERDA	% PERDA MÉDIA	CLASSIFICAÇÃO
5 C 10	29,64	0,26	99,12280702	98,30949479	Muito Friável
5 C 10	29,65	0,35	98,81956155		Muito Friável
5 C 10	29,53	0,89	96,98611581		Muito Friável
5 C 25	29,56	3,26	88,97158322	87,12796844	Muito Friável
5 C 25	29,99	4,12	86,26208736		Muito Friável
5 C 25	29,82	4,13	86,15023474		Muito Friável
5 C 50	29,95	0	100	98,48945761	Muito Friável
5 C 50	29,83	1,13	96,21186725		Muito Friável
5 C 50	29,59	0,22	99,25650558		Muito Friável
10 C 10	29,97	27,67	7,674341008	7,148603406	Muito Pouco Friavel
10 C 10	30,02	27,46	8,527648235		Muito Pouco Friavel
10 C 10	29,94	28,37	5,243820975		Muito Pouco Friavel
10 C 25	29,62	20,58	30,51991897	16,80047796	Muito Friável
10 C 25	30,14	27,01	10,3848706		Pouco Friável
10 C 25	29,80	26,97	9,496644295		Muito Pouco Friavel
10 C 50	29,83	19,85	33,4562521	29,34160158	Muito Friável
10 C 50	30,01	25,57	14,79506831		Pouco Friável
10 C 50	30,02	18,08	39,77348434		Muito Friável
15 C 10	29,89	28,75	3,81398461	3,697582926	Muito Pouco Friavel
15 C 10	29,95	28,65	4,340567613		Muito Pouco Friavel
15 C 10	29,61	28,74	2,938196555		Muito Pouco Friavel
15 C 25	29,88	28,26	5,421686747	3,95498273	Muito Pouco Friavel
15 C 25	29,70	28,87	2,794612795		Muito Pouco Friavel
15 C 25	29,60	28,52	3,648648649		Muito Pouco Friavel
15 C 50	30,00	24,87	17,1000000	10,71209273	Friabilidade Média
15 C 50	29,90	27,52	7,959866221		Muito Pouco Friavel
15 C 50	30,10	27,97	7,07641196		Muito Pouco Friavel

Fonte: próprio autor.

Gráfico 04 – Friabilidade x Pressão – Material C

Fonte: Próprio autor

Os briquetes confeccionados com o material C (Andiroba) apresentaram comportamento frágil para a menor carga de compressão (24,2 MPa), sendo todos classificados como muito friável.

A matéria base utilizada para a fabricação desses briquetes era constituída basicamente de granulados (de tamanho consideravelmente maior que as lascas existentes no material B), sem a presença de pó. Os resultados demonstraram uma baixa adesão das lascas ao menor nível de carga de compressão aplicado.

A maior dificuldade de adesão do material C apresentou-se como regra, quando comparadas as mesmas cargas de compactação e velocidades de teste dos outros materiais, o que sugere a aplicação de alternativas, durante o processo de fabricação, que viabilizem a maior adesão desse material, por exemplo, a trituração dessas lascas em lascas menores, o que, provavelmente, gerará um material com maior adesão quando compactado.

O objetivo dos testes com as velocidades de 10 e 25 rpm foi observar se esse incremento na velocidade mostrava uma boa maneira de diminuir o tempo dos ensaios, sem comprometê-los. Os resultados obtidos foram, no geral, bastante próximos, mostrando a eficácia desse incremento na velocidade no objetivo proposto.

O objetivo da utilização da velocidade de 50 rpm foi verificar se nesse valor de velocidade o briquete seria submetido à ação de uma força centrífuga que o fizesse estar sempre “impregnado” à borda do cilindro, não gerando as quedas. O que foi observado durante os testes foi que, por conta da velocidade mais alta, a palheta contida no cilindro, quando encontrava-se com o briquete, impactava-o, jogando-o para cima e gerando uma queda maior que o raio do cilindro, gerando resultados de perda de massa maiores.

5.5. Poder calorífico

Na tabela 11 estão apresentados os valores obtidos, com as massas ensaiadas, do poder calorífico superior (PCS) de amostras nas condições *in natura* e na condição de maior carga de compressão.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de poder calorífico dos diferentes materiais.

AMOSTRA	MASSA (g)	PCS (MJ/kg)
A – Como recebido	0,4923	16,157
A – 36,3 MPa (7,5 t)	0,9554	16,036
B – Como recebido	0,8859	18,031
B – 72,6 MPa (15 t)	0,8900	18,582
C – Como recebido	0,5132	17,524
C – 72,6 MPa (15 t)	0,5080	17,959

Fonte: próprio autor.

O substancial ganho de poder calorífico advindo do processo de briquetagem, onde se mantém o volume constante, não foi observado pelo motivo citado em 4.2.4. Com a metodologia adotada, de fixar a massa para observar a influência da briquetagem nos valores de poder calorífico, não foram obtidas diferenças superiores a 3% entre os materiais briquetados e os que não passaram pelo processo de briquetagem.

Durante alguns processos de briquetagem, com aquecimento e/ou com altíssimas cargas de compressão - onde o atrito do material com o molde gera bastante calor -, há uma significativa redução da umidade do material, o que conferiria um aumento do poder calorífico da amostra briquetada. Entretanto, o processo de fabricação em laboratório ao qual os materiais foram submetidos não envolve aquecimento nem cargas de compressão elevadas o suficiente para gerar o calor necessário para uma desumidificação que gere um aumento significativo no poder calorífico das amostras.

5.6 Delineamento experimental

Na figura 22 se visualiza o resumo da análise de variância para os fatores utilizados na pesquisa (tipos de materiais, pressões e velocidades) e respectivas interações, enquanto na figura 23 se insere o teste de Tukey para as médias do fator madeira. Já nas figuras 24 e 25 são apresentados os resultados das análises de regressão para os dois fatores quantitativos (pressão e velocidade).

Figura 22 - Saída do programa Sanest - análise de variância.

QUADRO DA ANALISE DE VARIANCIA					
CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	298.5466217			
MADEIRA	2	22367.7127862	11183.8563931	160.9467	0.00001
PRESSAO	2	51921.9757383	25960.9878691	373.6041	0.00001
VELOC	2	1009.5259308	504.7629654	7.2640	0.00201
MAD*PRE	4	25924.4019396	6481.1004849	93.2694	0.00001
MAD*VEL	4	568.1248920	142.0312230	2.0440	0.10084
PRE*VEL	4	721.7985807	180.4496452	2.5968	0.04612
MAD*PRE*VEL	8	1035.6257049	129.4532131	1.8630	0.08586
RESIDUO	52	3613.3742145	69.4879657		
TOTAL	80	107461.0864087			

Fonte: próprio autor.

Os resultados da análise de variância demonstraram elevados níveis de significância para os três fatores analisados (material, pressão e velocidade). O fator velocidade, por exemplo, com valor de F igual a 7,264 apresentou resultado significativo em nível de 0,2%, valor este que representa a probabilidade de erro ao se rejeitar a hipótese de nulidade. Os resultados demonstram ainda significâncias em nível de 5% para a interação entre os fatores, à exceção da interação madeira x velocidade, cujo de nível de significância foi de 10%.

Figura 23 - Saída do programa Sanest – teste de Tukey para madeira.

TESTE DE TUKEY PARA MEDIAS DE MADEIRA							
NUM.ORDEM	NUM.TRAT.	NOME	NUM.REPET.	MEDIAS	MEDIAS ORIGINAIS	5%	1%
1	3	M3	27	39.508889	39.508889	a	A
2	2	M2	27	29.529260	29.529260	b	B
3	1	M1	27	0.343704	0.343704	c	C

Fonte: próprio autor.

Figura 24 - Análise de variância da regressão (pressão).

REGRESSAO POLINOMIAL PARA OS NIVEIS DE PRESSAO

QUADRO DA ANALISE DE VARIANCIA

CAUSAS DA VARIACAO	G. L.	S. Q.	Q. M.	VALOR F	PROB. >F
REGRESSAO LINEAR	1	42185.4962663	42185.4962663	607.09068	0.00001
DESVIOS DE REGR.	1	9736.4793101	9736.4793101	140.11749	0.00001
RESIDUO	52	3613.3742145	69.4879657		

E Q U A C O E S P O L I N O M I A I S

* * X *

* Y = 79.027659 * -1.1549664 *

Fonte: próprio autor.

Figura 25 - Análise de variância da regressão (velocidade).

REGRESSAO POLINOMIAL PARA OS NIVEIS DE VELOCIDADE

QUADRO DA ANALISE DE VARIANCIA

CAUSAS DA VARIACAO	G. L.	S. Q.	Q. M.	VALOR F	PROB. >F
REGRESSAO LINEAR	1	596.3359945	596.3359945	8.58186	0.00520
DESVIOS DE REGR.	1	413.1897744	413.1897744	5.94621	0.01725
RESIDUO	52	3613.3742145	69.4879657		

E Q U A C O E S P O L I N O M I A I S

* * X *

* Y = 18.467789 * 0.1644528 *

Fonte: próprio autor.

Observa-se ainda que os dados de perda de massa (friabilidade) se ajustaram a modelos de regressão linear para os fatores pressão e velocidade com níveis de significância inferiores a 1%.

6. CONCLUSÃO

Com relação aos materiais envolvidos na produção, o que demonstrou os melhores resultados, nas condições propostas, foram os briquetes de bagaço de cana. O material A apresentou mais percalços para a produção, tanto que foi o que obteve menor produção (briquetes/hora). Entretanto, os problemas de processamento dos materiais, por exemplo, separação e padronização de tamanho, são extintos com a utilização de equipamentos adequados para os devidos fins.

Analisando os resultados, conclui-se que o teste de tamboreamento, realizado com o friabilômetro, forneceu com eficácia com relação aos indícios do parâmetro friabilidade nos briquetes de biomassa, produzidos em laboratório.

A metodologia aplicada aos ensaios, os parâmetros de velocidade e número de voltas (que foi fixo em todo o trabalho), além da geometria do cilindro (altura de queda das amostras) devem, ainda, ser cada vez mais explorados, buscando reproduzir com maior fidelidade o que ocorre, em termos de abrasão e impacto, desde o processo de fabricação até a chegada ao consumidor final com os briquetes.

REFERÊNCIAS

- GALEMBECK F.; BARBOSA C. A. S.; SOUSA R. A. **APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL DE BIOMASSA E DE RECURSOS NATURAIS NA INOVAÇÃO QUÍMICA**. Química Nova, São Paulo, volume 32, número, páginas 571-581. 2009.
- ZANELLA K., TARANTO O.P. **INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DA PECTINA NA FRIABILIDADE DO BRIQUETE DE CARVÃO VEGETAL**. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza. 2016.
- QUIRINO W. F., BRITO J. O. **CARACTERÍSTICAS E ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL**. Laboratório de Produtos Florestais. Série técnica número 13. 1991.
- VALE A.T., *et al.* **ANÁLISE ENERGÉTICA DE BRIQUETES DE RESÍDUOS DE *Eucalyptus spp.*, *Dipterix alata*, *Caryocar brasiliense* E *Musa spp.*** ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v. 14 n.25. p. 108. 2017.
- PADILLA, E. R. D, *et al.* **Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açúcar**. Revista Virtual de Química, Niterói, volume 8, número 5. 2016.
- DANTAS, A.P.; SANTOS, R. R. S.; SOUZA, S.C. **O BRIQUETE COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA**. III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Goiânia, Goiás. 2012.
- AGUIAR S. B. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM FRIABILÔMETRO DE BANCADA PARA ENSAIOS COM BRIQUETES**. 55 p. Monografia – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará. 2017.
- GONÇALVES B. F. *et al.* **CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE SERRAGEM DE *Eucalyptus grandis* PARA CONFECÇÃO DE BRIQUETES**. Revista do Instituto Florestal. v. 25, n. 2, p. 205 – 213. 2013.
- OSHIRO, T. L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos**. 78 f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná. 2016.
- PAULA, L. E. R. *et al.* **Produção e avaliação de briquetes e resíduos lignocelulósicos**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo. 2011.
- JÚNIOR, A. F. D. *et al.* **Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo. 2014.

PADILLA, E. R. D, et al. **Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açúcar**. Revista Virtual de Química, Niterói, volume 8, número 5. 2016.

QUIRINO, W, F. **UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS VEGETAIS**. Laboratório de Produtos Florestais IBAMA. 2003.

SANT'ANA. et al. **Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da agroindústria**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.14, n.3, p.289-294. 2012.

GADELHA, A. M. T. et al. **Determinação do poder calorífico de “Blends” da poda do cajueiro (*Anacardium occidentale*) e da poda da mangueira (*Mangifera*)**. 67ª Reunião Anual da SBPC.

SLUITER, J. B. et al. **Compositional Analysis of Lignocellulosic Feedstocks. 1. Review and Description of Methods**. Journal of Agricultural and Food Chemistry. Volume 58, número 16, páginas 9043-9053. 2010.

GADELHA, A. M. T. et al. **CASCA DA CASTANHA DE CAJU SEM A PRESENÇA DA LCC PARA POSSÍVEIS APLICAÇÕES ENERGÉTICAS**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Fortaleza, Ceará. 2015.

FONTES, P. J. P. de. et al. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: DPQ/IBDF, 1984.

SILVA, D. A. et al. **CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSAS PARA A BRIQUETAGEM. FLORESTA**, Curitiba, Paraná, volume 45, número 4, páginas 713 – 722. 2015.

CARVALHO, E. A. et al. **Aglomerado: parte I: briquetagem**. Tratamento de minérios. 5ª edição. Rio de Janeiro. 2010.

ORMOND, J. G. P. **Glossário de termos usados em atividades agropecuárias, florestais e ciências ambientais**. 54 p. 3ª. edição. Rio de Janeiro: BNDES, 2006.

MARCHIORI, Junior. **Aproveitamento de Resíduos de Madeira para Confecção de Briquetes**. Monografia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2006.

SANTANA C. A .M, et al. **Biomassa Para Química Verde**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília – DF, 1ª edição. 2013.

GOLDEMBERG, J. **BIOMASSA E ENERGIA**. Química Nova, São Paulo, volume 32, número 3, páginas 582-587. 2009.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 13 ed. São Paulo, Nobel, 486p. 1990.

<https://www.dctech.com.br/friabilometro-teste-de-friabilidade-de-comprimidos-na-industria-farmaceutica/> acesso 13/07/2017 às 10:26.

<http://www.braskem.com/site.aspx/Cana-de-Acucar>, acesso em 13/07/2017 às 14:37.

<http://madeireiracacique.com.br/madeira-andiroba-caracteristicas-e-usos> acesso em 13/07/2017 às 14:52.

<http://www.amatabrasil.com.br/conteudo/xiloteca/muiracatiara> acesso: 13/07/2017 às 15:19

<http://www.madeireiraavare.com.br/tiposdemadeira/7.htm> , acesso: 13/07/2017 às 15:25

<http://globalwood.com.br/ficha-tecnica-madeira-de-pinus/> , acesso: 13/07/2017 às 15:11.

<http://labcontrol.com.br/bomba-calorimetrica-c-200/> , acesso: 13/07/2017 às 12:03