



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE PROPRIEDADES TÉRMICAS
DE BRIQUETES DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

CAIO JEAN MORAES DE LIMA
NATAL - RN, 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE BRIQUETES DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

CAIO JEAN MORAES DE LIMA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico, orientado pelo Prof. George Santos Marinho.

NATAL - RN

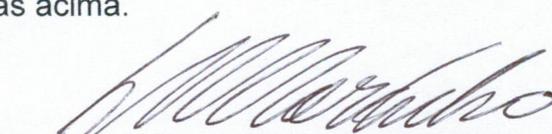
2018



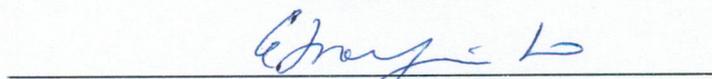
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Natal, 21 de março de 2018.

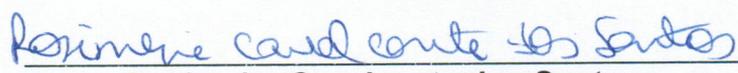
Ao(s) **vinte e um** dia(s) do mês de **março** do ano de **dois mil e dezoito**, às **10:00 horas**, no **mini auditório da arquitetura**, neste Campus Universitário, instalou-se a banca examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso do(a) aluno(a) **Caio Jean Moraes de Lima**, matrícula **2016007329**, do curso de Engenharia Mecânica. A banca examinadora foi composta pelos seguintes membros: **George Santos Marinho**, orientador; **Edna Moura Pinto**, examinador interno; **Rosimeire Cavalcante dos Santos**, examinador interno. Deu-se início à abertura dos trabalhos pelo **George Santos Marinho**, que após apresentar os membros da banca examinadora, solicitou a (o) candidato (a) que iniciasse a apresentação do trabalho de conclusão de curso, intitulado **“ANÁLISE DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE BRIQUETES DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR”**, marcando um tempo de trinta minutos para a apresentação. Concluída a exposição, **George Santos Marinho, orientador**, passou a palavra aos examinadores para arguirem o(a) candidato(a); após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento; tendo sido Aprovado, o(a) candidato(a), conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A versão final do trabalho deverá ser entregue à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, no prazo de 45 dias; contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Conforme o que rege o Projeto Político Pedagógico do Curso de Engenharia Mecânica da UFRN, o(a) candidato(a) não será o aprovado(a) se não cumprir as exigências acima.



George Santos Marinho
Orientador



Edna Moura Pinto
Examinador interno



Rosimeire Cavalcante dos Santos
Examinador interno

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha irmã Taís Moraes e aos meus pais Marlos Jean e Márcia Moraes por sempre acreditarem em mim e por me conferirem todo o apoio necessário. Obrigado pelo amor e carinho durante toda a minha vida.

Agradeço aos meus familiares e amigos pelos momentos de descontração e o suporte dado para que eu chegasse até aqui.

À minha namorada Carolina Rodrigues pelo companheirismo e compreensão durante a confecção deste trabalho.

Aos companheiros da L'auto cargo pela ajuda quando precisei me ausentar da empresa para realizar atividades acadêmicas.

Ao CNPq por ter me dado a oportunidade de estudar e realizar pesquisa na University of Ottawa através do Ciências se Fronteiras e no Laboratório de transferência de Calor através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação.

Ao meu professor orientador George Santos Marinho e ao Laboratório de Transferência de calor.

Ao professor Alexandre Santos Pimenta e ao Laboratório da Tecnologia da Madeira por abrir as portas para a utilização de seus equipamentos.

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho e minha graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

LIMA, C. J. M. **ANÁLISE DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE BRIQUETES DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**. 2018. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2018.

Resumo

Diante dos efeitos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis, despertou-se para a necessidade de intensificar o uso de fontes renováveis de energias. Considerando-se a magnitude da produção de cana-de-açúcar no Brasil, se faz indiscutível a oportunidade de aproveitamento dos resíduos gerados pela indústria sucroalcooleira. Com o propósito de contribuir nesse sentido, estudaram-se as propriedades térmicas de briquetes produzidos com o pó de bagaço de cana. Assim, foram coletadas amostras da biomassa, produzidos briquetes e analisadas suas propriedades térmicas em função de três pressões de compactação, 50, 100 e 150 bar. Os briquetes foram confeccionados utilizando-se máquina hidráulica com controles eletrônicos de pressão e aquecimento resistivo. Um analisador térmico foi utilizado para estimativa das propriedades térmicas das amostras. Diante dos resultados os briquetes compactados a 150 bar apresentaram condutividade térmica e capacidade térmica calorífica significativamente maiores que as demais amostras. Enquanto que os briquetes submetidos à pressão de compactação de 50 bar apresentaram difusividade térmica significativamente maior que os demais exemplares. Com base nos resultados, foi possível constatar a influência da pressão de compactação dos briquetes feitos com o resíduo agrícola em suas propriedades térmicas.

Palavras-chave: Bagaço de cana-de-açúcar; Biomassa; Briquete.

LIMA, C. J. L. **THERMAL PROPERTIES ANALYSIS OF SUGARCANE BAGASSE BRIQUETTES**. 2018 43 p. Conclusion work project (Graduate in Mechanical Engineering) - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2018.

Abstract

Faced with the environmental effects of using fossil fuels, it has awakened to the need to migrate the world energy matrix to renewable sources of energy. Considering production magnitude of sugarcane in Brazil, it is indisputable that the waste generated by the sugar cane industry can have its energy serviceable. In order to contribute in this way, the thermal properties of briquettes produced with the sugarcane bagasse powder were studied. Thus, biomass samples were collected, briquettes were produced and their thermal properties were analyzed as a function of three compaction pressures, 50, 100 and 150 bar. The briquettes were made using a hydraulic machine with electronic pressure controls and resistive heating. A thermal analyzer was used to estimate the thermal properties of the samples. Considering the results, the briquettes compacted at 150 bar presented thermal conductivity and heat capacity significantly higher than the other samples. While the briquettes submitted to the compression pressure of 50 bar presented significantly higher thermal diffusivity than the other specimens. Based on the results, it was possible to verify the influence of the compaction pressure of the briquettes made with the agricultural residue on its thermal properties.

Keywords: Sugar cane waste; Biomass; Briquette.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Oferta interna de energia elétrica por fonte – Ano Base 2016.	13
Figura 2.2. Estoque de bagaço de cana em área externa de usina.	15
Figura 2.3. Incêncio em estoque de Cana-de-açúcar.....	16
Figura 3.1. Bagaço após lavagem e secagem ao Sol.	23
Figura 3.2. Equipamento Picador Forrageiro.....	24
Figura 3.3. Peneiras utilizadas na moagem.	24
Figura 3.4. Estufa de Secagem SP-102.	25
Figura 3.5. Briquetadeira LB-32 LIPPEL.	26
Figura 3.6. Briquetes vistos de cima.	26
Figura 3.7. Vista lateral dos briquetes.	27
Figura 3.8. (A) Analisador térmico KD2 PRO, (B) Sonda SH-1	27
Figura 3.9. Câmara preenchida com material isolante.	28
Figura 3.10. Medição das propriedades térmicas em andamento.....	29
Figura 4.1. Comparativo das médias de condutividade térmica para as três pressões ensaiadas.	30
Figura 4.2. Comparativo das médias de resistividade térmica para as três pressões ensaiadas.	31

Figura 4.3. Comparativo das médias de capacidade calorífica volumétrica para as três pressões ensaiadas.....32

Figura 4.4. Comparativo das médias de difusividade térmica para as três pressões ensaiadas.....33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PIB	Produto Interno Bruto
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
UNICA	União da Indústria de Cana de Açúcar
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

K	Conductividade térmica (W/m.K)
r	Resistividade térmica (K.m/W)
α	Difusividade térmica (mm ² /s)
$\rho \cdot C_p$	Capacidade calorífica volumétrica (MJ/m ³ .K)
c	Calor específico (kJ/kg.°C)

SUMÁRIO

Agradecimentos	1
Resumo	2
Abstract	3
Lista de Ilustrações	4
Lista de Abreviaturas e Siglas	6
Lista de Símbolos	7
1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Hipótese.....	11
1.2 Objetivo Geral	11
1.3 Objetivos Específicos	11
2 FUNDAMENTAÇÃO.....	12
2.1 Potencial da Biomassa no Brasil	12
2.2 Impacto gerado pelos resíduos não aproveitados	14
2.3 O processo de briquetagem	17
2.4 Propriedades Térmicas	19
2.4.1 Densidade (ρ).....	20
2.4.2 Calor específico (c)	20
2.4.3 Condutividade Térmica (k)	20
2.4.4 Resistividade Térmica (r).....	21
2.4.5 Capacidade Calorífica Volumétrica (ρc_p).....	21
2.4.6 Difusividade Térmica (α)	22

3 MATERIAL E PROCEDIMENTOS	23
3.1 Obtenção e Preparação do Material.....	23
3.2 Moagem, Secagem e Briquetagem.....	24
3.2.1 Moagem.....	24
3.2.2 Secagem.....	25
3.2.3 Briquetagem	25
3.3 Mensuração das Propriedades Térmicas.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1 Condutividade	30
4.2 Resistividade	31
4.3 Capacidade calorífica volumétrica.....	32
4.4 Difusividade.....	33
5 CONCLUSÕES	34
6 REFERÊNCIAS.....	35
7 ANEXOS	359

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o CONAB (2016) devido à alta do preço do petróleo e a conscientização da população sobre os efeitos indesejáveis da utilização de combustíveis fósseis o momento se mostra muito favorável para a agroindústria canavieira. No que se refere à produção de energia, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e dos respectivos subprodutos (CONAB, 2016).

Segundo o IPEA (2012) o Brasil é o maior produtor mundial de Cana-de-açúcar, conseqüentemente o processamento dessa commodity gera quantidades excessivas de resíduos, o montante chega a ser de 201 milhões de toneladas de resíduos por ano.

Os resíduos gerados pelo processamento de commodities como a cana-de-açúcar é aproveitado para gerar energia de diversas formas. Conforme dados da publicação da Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2017) a biomassa no Brasil representa aproximadamente 9% da matriz energética nacional. De acordo com o Ministério de Minas e Energia - MME (2017) os subprodutos sucroalcooleiros são responsáveis por gerar 7% do total de energia da matriz brasileira.

Ainda segundo MME (2017) o potencial de geração de energia dos subprodutos da cana-de-açúcar é de duas vezes e meia maior do que o que é gerado hoje. O CONAB (2016) corrobora que o potencial energético da biomassa da cana-de-açúcar é bastante relevante, porém não é muito explorado por falta de políticas incentivadoras nesse segmento.

Diante do exposto, justificam-se pesquisas e detalhamentos energéticos mais aprofundados nos substratos sucroalcooleiros, visando aprimorar técnicas de aproveitamento energeticamente eficientes.

1.1 Hipótese

A pressão de compactação do processo de briquetagem influencia diretamente nas propriedades térmicas de briquetes produzidos com pó de bagaço de cana-de-açúcar.

1.2 Objetivo Geral

Identificar efeitos da compactação nas propriedades térmicas de briquetes de bagaço de cana.

1.3 Objetivos Específicos

- Preparar amostras de bagaço de cana para a briquetagem;
- Confeccionar briquetes de bagaço de cana;
- Mensurar propriedades térmicas (Condutividade térmica, resistividade térmica, capacidade calorífica volumétrica e difusividade térmica) das amostras selecionadas;
- Analisar as propriedades térmicas por meio de comparativo entre as diferentes pressões de compactação.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Foram considerados trabalhos disponíveis sobre o bagaço de cana e explorados aspectos ambientais e energéticos dos mesmos, visando contextualizar o tema em questão no âmbito de interesse da engenharia.

2.1 Potencial da Biomassa no Brasil

O Brasil é considerado como um dos maiores produtores agrícolas devido a disponibilidade de área para cultivo, e condições climáticas adequadas a introdução de diversas culturas, afigura-se, portanto como um fornecedor com potencial altíssimo de matérias primas para a produção de bioenergia (VIEIRA, 2012).

Com o crescimento da produção o Brasil vem se consolidando como um grande fornecedor no mercado internacional de alimentos. Segundo projeção do ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento a produção de lavouras entre os anos de 2010 e 2020 deverá crescer a uma taxa anual média de 2,67%, tornando o agronegócio brasileiro responsável por mais de 15% do PIB nacional (IPEA, 2012).

Dentre os alimentos produzidos destaca-se a cana-de-açúcar, que é cultivada em mais de 110 países e o Brasil lidera o ranking como o maior produtor mundial desse insumo. Além disso a produção dessa commodity segue com crescimento acentuado, segundo dados do CONAB (2016) a produção de cana-de-açúcar para a safra 2016/2017 foi estimada em 694 milhões de toneladas, crescendo cerca de 4,4% em relação à safra anterior.

Segundo a Figura 2.1. com dados da Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2017), a biomassa representava, no ano de 2016, 8,2% da oferta interna de energia elétrica no país, apesar de o Brasil ser um país majoritariamente agrícola, a utilização da biomassa para geração de energia ainda é pouco expressiva.

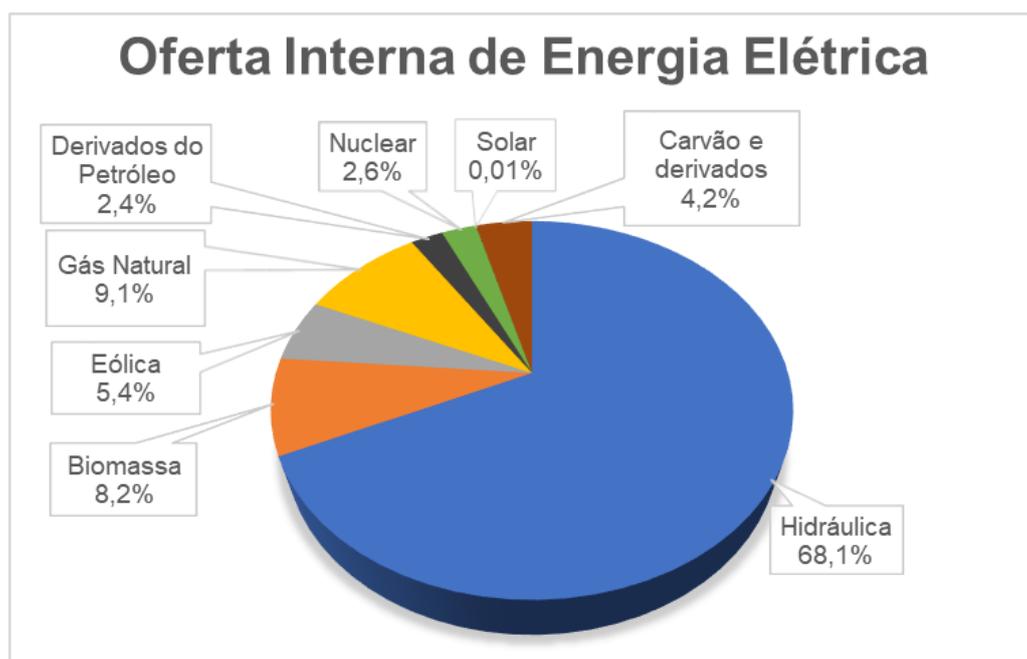


Figura 2.1. Oferta interna de energia elétrica por fonte – Ano Base 2016.

Fonte: Adaptado de EPE (2017).

De acordo com Oshiro (2016) os benefícios do reaproveitamento energético desses resíduos são inúmeros, nos âmbitos sociais, ambientais e econômicos. A mudança do sistema de destinação final dos resíduos leva à redução do volume anual a ser aterrado ou disposto de forma inadequada, consequentemente reduzindo as áreas requeridas para os aterros sanitários. Além de trazer benefícios indiretos, como a geração de emprego e renda.

Da energia disponível na cana-de-açúcar, o álcool responde por aproximadamente um terço, sendo o restante contido no bagaço e na palha. Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA, no Brasil, o aproveitamento da energia resultante da queima desses resíduos pode gerar cerca de 28 mil MW de energia, ou seja, o equivalente ao dobro da energia produzida pela hidroelétrica de Itaipu. Contudo, apenas 7 mil MW desse potencial são atualmente aproveitados (GREENPEACE, 2010 apud ÚNICA, 2009).

Enquanto que o caldo já é amplamente explorado de forma competitiva em nível mundial, tanto em quantidade quanto em qualidade, sabe-se que a fração da cana referente a biomassa só recentemente vem ganhando notoriedade para sua exploração. De acordo com o IPEA (2012) estima-se que

o bagaço proveniente da agroindústria da cana seja aproximadamente 280kg por tonelada de cana moída, ou seja, aproximadamente 30% do total. Seguindo essa estimativa a safra de 2016/2017 teria gerado cerca de 208 milhões de toneladas de resíduos sucroalcooleiros.

2.2 Impacto Gerado Pelos Resíduos Não Aproveitados

Devido ao aumento crescente na demanda energética global e do avanço tecnológico proveniente da crise dos combustíveis fósseis aumentou-se a pressão sobre as florestas. O uso de forma irracional sem respeitar qualquer regime de manejo acentua a preocupação com o desmatamento indiscriminado das florestas. (OLIVEIRA et al., 2006)

De acordo com Vale e Gentil (2008) a poluição e o uso dos resíduos gerados pela utilização da biomassa vegetal são pontos a nos preocupar. Na maioria das vezes os resíduos vegetais são descartados de forma inadequada ou queimados descontroladamente buscando sua eliminação. Medidas essas que causam impactos ambientais devido ao aumento considerável da poluição como um todo, além de representar perdas de matéria prima e energia.

Impacto ambiental é descrito pela resolução CONAMA N. 001, de 23 de janeiro de 1986:

“[...] qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais” (CONAMA 1986).

Mota et al. (2009) enuncia que o descarte dos resíduos tem se tornado um problema mundial quanto ao prejuízo e a poluição do meio ambiente, onde se pode afetar o solo, a água e o ar. A poluição do solo e da água pode causar alterações físico-químicas no ambiente representando uma ameaça à saúde pública e transformando-se em um ecossistema propício para ao desenvolvimento de transmissores de doenças.

Os resíduos de origem florestal e agrícola formam uma categoria interessante de biomassa que pode ser explorada. A serragem de madeira, as cascas dos grãos do café e o bagaço de cana no Brasil, constituem resíduos de baixo custo, renováveis e às vezes mal aproveitados, ambientalmente corretos e potencialmente capazes de gerar calor, vapor e energia elétrica, podendo, dessa forma contribuir como combustível alternativo na geração de energia. (VALE et al., 2007)

Conforme Purohit et al. (2006), apud Paula (2014) os resíduos vegetais sem tratamento apresentam as seguintes características: dificuldade no controle da taxa de combustão, queima rápida necessitando de reabastecimento frequente, dificuldade de mecanização contínua, grandes volumes de área de armazenamento, problemas no transporte e distribuição. Segundo os autores muitas dessas desvantagens são atribuídas a baixa densidade dos resíduos de produtos agrícolas.

A estocagem do bagaço nos pátios das usinas é um dos fatores que contribuem para a ineficiência de sua exploração. A organização física das pilhas é complicada pelas suas dimensões (ver figura 2.2). Na maioria das usinas brasileiras, um trator espalha o bagaço no alto da pilha, que pode chegar a ter cerca de 300 m de extensão, 100 m de largura e 40 m de altura (aproximadamente 100.000 toneladas de bagaço estocadas). Nestas, a deterioração da camada externa protege as camadas internas, gerando perdas de até 15 %.



Figura 2.2. Estoque de bagaço de cana em área externa de usina.

Fonte: Imagem ilustrativa da internet (<http://goo.gl/LN0sgM>)

Após a extração do caldo, o bagaço sai das moendas com uma umidade de aproximadamente 50%, e com cerca de 2 a 3% de açúcar que, devido ao alto teor de umidade e à ação microbiana, sofre fermentação, um processo exotérmico, provocando sua deterioração e afetando diretamente suas características, o que, muitas vezes, provoca combustões espontâneas e indesejadas, (ver figura 2.3). Essa deterioração é causada, principalmente, por fungos pertencentes à classe dos Basidiomicetos. Esses fungos dividem-se naqueles que causam a podridão parda, destruindo os polissacarídeos da parede celular (hemicelulose e celulose) e os que causam a podridão branca que, além de polissacarídeos, destroem também a lignina (TEIXEIRA e COSTA, 1997 apud SANTOS et al., 2011)



Figura 2.3. Incêndio em estoque de Cana-de-açúcar

Fonte: Imagem ilustrativa da Internet (<https://goo.gl/NWScT9>)

Nesse contexto empresas buscam cada vez mais autossuficiência de matéria prima em quantidade e qualidade, dando importância substancial ao desenvolvimento de novas tecnologias voltadas ao aproveitamento de resíduos, as quais se tornam cada vez mais autossustentáveis (COSTA Jr., 2015).

2.3 O Processo de Briquetagem

Conforme Carvalho e Brinck (2004) em 1848, nos Estados Unidos, William Easby patenteou um método que convertia carvões miúdos em torrões sólidos por meio da pressão. Depois de 14 anos da patente de Easby, a palavra *briquette* surgiu na cidade de Paris, na França, sendo uma mistura de turfa, água e argila plástica. Ainda segundo Carvalho e Brinck (2004), na década de 60 surgiram as primeiras iniciativas de utilização deste processo no Brasil, na companhia Siderúrgica Belgo Mineira do estado de Minas Gerais, com a instalação de um equipamento da empresa alemã Humboldt.

Quirino (ND) atesta que o processo de briquetagem consiste na densificação de resíduos, todos os resíduos de origem vegetais podem ser compactados pela briquetagem, basta atender as especificações do processo, ou seja, uma granulometria e um teor de umidades controladas. A vantagem desse processo está em transformar um resíduo de baixíssima densidade em uma lenha ecológica de alta qualidade, pois quando comparado a lenha, o briquete apresenta propriedades mais vantajosas para o uso energético.

De acordo com a empresa LIPPEL (2017), fabricante da briquetadeira utilizada neste trabalho, a densificação do resíduo de madeira através do processo de briquetagem consiste na compactação a elevadas pressões, e aumento da temperatura do processo da ordem de 100°C, que em seguida provocará a plastificação da lignina, substância que atua como elemento aglomerante das partículas de madeira, justificando a não utilização de produtos aglomerantes (resinas e ceras).

Figueiroa e Moraes (2009) afirmam que, durante o aquecimento, a lignina torna-se uma cadeia desordenada e móvel. Entretanto após o resfriamento do briquete, a lignina volta a ser rígida e apresenta aspecto vitrificado, processo este denominado de transição vítrea. Essa propriedade é extremamente favorável para a produção de briquetes, já que ela permite a remodelação do material, garantindo um briquete de formato definido e sólido.

De acordo com Fontes et al. (1984), através do processo de briquetagem é possível conseguir um combustível com homogeneidade granulométrica, maior densidade e resistência a geração de finos no manuseio e transporte. O aumento na densidade proporcionado pelo processo de

compactação é capaz de produzir um combustível com maior concentração energética por unidade de volume, desse modo, juntamente com a resistência adquirida pelo material tem-se uma viabilidade técnica e econômica para o transporte em maiores distâncias.

A briquetagem é uma forma eficiente para concentrar a energia disponível na biomassa. Este fato é explicado pela consideração de que 1m³ de briquetes contém pelo menos quatro vezes mais energia que 1m³ de resíduos em sua forma original, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio destes materiais (QUIRINO e BRITO, 1991).

A técnica da briquetagem quando aplicada pode resolver os problemas que as usinas e destilarias atuais enfrentam quando tentam fazer uso do bagaço sem estudo prévio ou técnica bem definida. Segundo Almeida e Clua (2004, apud Santos et al., 2011) como a indústria agrícola tem carácter sazonal faz-se necessária a formação de estoques reguladores afim de suprir a carência de biocombustível no período de entressafra.

De acordo com Silva et al. (2015) os resultados obtidos nos testes de expansão longitudinal e resistência mecânica dos briquetes são extremamente satisfatórios. O resultado de compressão diametral realizado pelo autor indicou que os briquetes de bagaço de cana podem suportar uma compressão equivalente a um empilhamento de 20 metros de material, ou seja, uma resistência ao empilhamento considerada alta para os padrões de armazenagem brasileiros, no qual a maioria dos armazéns são inferiores a 10 metros de altura.

De acordo com Paula (2014), os briquetes podem proporcionar um destino viável, econômico e ambientalmente, aos resíduos. Além de ter formato regular e constituição homogênea, o que resulta em queima uniforme do material, o briquete é facilita o manuseio e transporte, reduz a humidade e aumenta a densidade energética do substrato vegetal. Apesar das características citadas, o uso dos briquetes no Brasil ainda não está nem próximo de atingir seu potencial máximo, devido à falta de iniciativa e de estudos que otimizem e viabilizem os processos envolvidos.

2.4 Brique de Bagaço de Cana como Opção Energética

Como já citado o bagaço de cana de açúcar tem um enorme potencial para aproveitamento energético. Essa biomassa pode ser reaproveitada de diversas maneiras, a mais trivial delas seria a queima direta do bagaço para geração de calor, porém Santos et al (2011) atestam que a umidade do bagaço recém moído chega a 50%, fator que minimiza a eficiência da queima.

Outro possível meio de utilização da biomassa da cana é através da produção de biogás, porém Galbiatti et al. (2010) concluíram que a geração do mesmo a partir da mistura de esterco bovino e bagaço de cana prejudica a produção acumulada de biogás e sua qualidade.

O resíduo da biomassa descartado pela indústria sucroalcooleira pode ser aproveitado como fonte de energia por meio do processo de briquetagem. Conforme destacou Rocha (2015), em termos energéticos, a briquetagem visa aumentar o poder calorífico e a temperatura de chama. No presente trabalho, foram investigados efeitos da compactação (briquetagem) nas propriedades térmicas do bagaço-de-cana.

2.5 Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas podem ser subdivididas em duas categorias distintas, as propriedades de transporte e as propriedades termodinâmicas. Incropera et al. (2008) afirma que as propriedades de transporte mensuram o comportamento dos materiais no que diz respeito a transporte de energia, como por exemplo coeficientes e taxas de difusão, como k , a condutividade térmica e ν , a viscosidade cinemática. Já as propriedades termodinâmicas, por outro lado, dizem respeito ao estado de equilíbrio de um sistema, como exemplo temos a densidade.

2.5.1 Densidade (ρ)

Segundo Çengel et al. (2014) a densidade é definida como massa por unidade de volume. Sendo assim sua unidade no S.I é kg/m^3 .

Rodrigues (2010) estabelece que a briquetagem aumenta a densidade da matéria prima, característica importantíssima para o uso como combustível de materiais que apresentam baixa densidade.

Fontes (1984) atesta que a briquetagem proporciona uma densificação no material que conseqüentemente aumenta a concentração energética por volume.

2.5.2 Calor Específico (c)

A definição de calor específico estabelece que ele representa a energia necessária para elevar em um grau a temperatura de uma massa unitária de uma substância, e sua unidade usual é $\text{kJ/kg.}^\circ\text{C}$ (ÇENGEL et al., 2014).

A termodinâmica aborda dois tipos de calor específico, o que é obtido a pressão constante (C_p), e o que é obtido a volume constante (C_v). Quando se trata de propriedades de materiais incompressíveis como sólidos e líquidos os valores de C_p e C_v são iguais. Como neste presente trabalho o material estudado é solido o calor específico será denominado apenas de c .

2.5.3 Condutividade Térmica (k)

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte, pois ela nos fornece a taxa na qual a energia é transferida em um material pelo processo de difusão térmica, ela depende de fatores como estrutura física, atômica e molecular da matéria (INCROPERA et al., 2008).

A partir da Lei de Fourier encontra-se a equação matemática que descreve a condutividade térmica k em uma certa direção x , já que ela representa a proporcionalidade entre a taxa de transferência de calor e a variação de temperatura em um determinado comprimento nessa mesma direção (PISSANTI e RECH, 2010), abaixo está a formula matemática.

$$k_x = \frac{-q''_x}{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)} \quad (\text{W/m.K}) \quad (2.1)$$

A partir da equação infere-se que o fluxo térmico por condução aumenta de com o aumento da condutividade térmica para um dado gradiente de temperatura.

Para as direções y e z definições similares são aplicadas, dessa forma no caso em que o material é isotrópico a condutividade independe da direção analisada, $k_x = k_y = k_z = k$ (INCROPERA et al.,2008).

2.5.4 Resistividade Térmica (r)

Resistividade térmica é propriedade inversa a condutividade térmica, ou seja, quanto maior a resistividade maior serão as propriedades isolantes do material. A sua unidade dimensional pode ser observada na equação abaixo.

$$r = \frac{1}{k} \quad (\text{k.m/W}) \quad (2.2)$$

2.5.5 Capacidade Calorífica Volumétrica (ρc_p)

A capacidade calorífica volumétrica advém do produto de duas propriedades termodinâmicas já citadas, a densidade(ρ) e o calor específico(c).

A capacidade calorífica volumétrica nos indica a capacidade de um material de armazenar energia por unidade de volume. Substâncias que possuem densidade elevada usualmente são caracterizadas por calores específicos pequenos, muitos sólidos e líquidos então têm valores de capacidade calorífica volumétricas comparáveis. Contudo devido às baixíssimas densidades os gases são muito pouco adequados para o armazenamento de energia térmica (INCROPERA et al., 2008).

2.5.6 Difusividade Térmica (α)

A difusividade térmica é obtida através da razão da condutividade térmica pela capacidade térmica volumétrica, sua unidade de medida é m^2/s .

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2.3)$$

Ela se mostra extremamente importante pois relaciona propriedades de transporte com propriedades termodinâmicas, nos indicando a capacidade do material em conduzir energia relacionado a sua capacidade de armazená-la. Materiais com a difusividade elevada responderão mais rapidamente a variações térmicas sob ele impostas, enquanto que materiais com esse valor reduzido levarão mais tempo para atingir uma nova condição de equilíbrio (INCROPERA et al., 2008).

3 MATERIAL E PROCEDIMENTOS

O presente capítulo detalha os processos realizados durante o trabalho. Desde a obtenção e preparação do material de estudo, até a briquetagem e coleta de dados para análise. Preparou-se o material no Laboratório de Transferência de Calor (LTC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em sequência realizou-se a moagem, secagem e briquetagem das amostras no Laboratório de Tecnologia da Madeira localizado na Escola Agrícola de Jundiá da UFRN. Posteriormente retornou-se para o LTC e realizou-se a análise dos briquetes obtidos.

3.1 Obtenção e Preparação do Material

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado na pesquisa foi obtido em um estabelecimento comercial alimentício na cidade de Natal/RN. O material havia sido recém manuseado para seu fim principal, produzir caldo de cana, e estava pronto para o descarte.

O bagaço de cana-de-açúcar coletado estava completamente embebido em seu caldo extremamente açucarado, portanto realizou-se a lavagem com água do material com o propósito de evitar problemas com insetos durante a estocagem e manuseio do bagaço.

Após a lavagem o material foi deixado para secagem sob ação do sol durante dois dias, pois a umidade elevada do bagaço dificultaria bastante a moagem. A figura 3.1. exibe como o material estava o procedimento descrito acima.



Figura 3.1. Bagaço após lavagem e secagem ao Sol.

3.2 Moagem, Secagem e Briquetagem

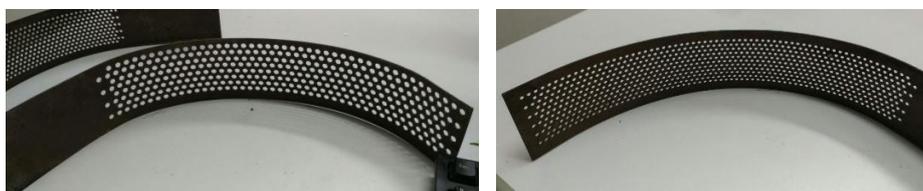
3.2.1 Moagem

Realizou-se a moagem do material com o auxílio do picador forrageiro de 1,5 cv AB Garthen da figura 3.2.



Figura 3.2. Equipamento Picador Forrageiro.

A moagem foi executada em duas etapas, a primeira delas utilizando a peneira de furos de 12mm, figura 3.3. (A), e a segunda etapa com a peneira de furos de 5mm, figura 3.3. (B).



(A)

(B)

Figura 3.3. Peneiras utilizadas na moagem.

Foi percebida a necessidade de realizar a moagem em duas etapas pois a potência do equipamento é de apenas 1,5 cv. Dessa forma quando se utiliza apenas a peneira de menor granulometria o bagaço oferecia muita resistência à passagem e causava o emperramento do equipamento.

3.2.2 Secagem

Como já mencionado o controle de umidade (secagem) do material a ser briquetado é essencial para que se alcance o objetivo esperado. Para que se atinja os 8% de umidade almejados o pó do bagaço-de-cana foi colocado para secar na estufa de circulação forçada de ar SP-102 da marca SPLABOR, (ver figura 3.4).



Figura 3.4. Estufa de Secagem SP-102.

O material foi deixado no forno a temperatura de 103°C durante 24 horas para garantir que estaria com o teor de umidade próximo de zero. Após retirado do forno foi adicionado água ao pó por meio de esguichos de forma que ao final do processo o material estivesse com aproximadamente 8% de umidade.

3.2.3 Briquetagem

Para a confecção dos briquetes foi empregada uma briquetadeira hidráulica da marca LIPPEL, modelo LB-32, de motor elétrico de 3cv, com matriz cilíndrica de dimensões internas de 35mm de comprimento, 45mm de largura e 280mm de altura, força máxima de compactação de 10 toneladas e controle de temperatura até 300°C, (ver figura 3.5).



Figura 3.5. Briquetadeira LB-32 LIPPEL.

Foram produzidos 21 briquetes, com em média 29g de pó de bagaço de cana-de-açúcar, com controle inicial do teor de umidade de 8%. O briquetes foram confeccionados com 5 minutos de compactação a 120°C, divididos em 3 tratamentos, 50, 100 e 150 Bar, com 7 repetições cada, ver figuras 3.6 e 3.7.



Figura 3.6. Briquetes vistos de cima.



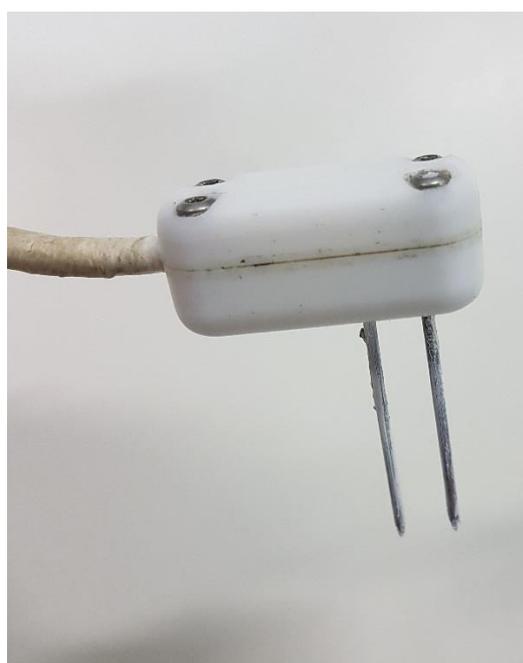
Figura 3.7. Vista lateral dos briquetes.

3.3 Mensuração das Propriedades Térmicas

A determinação das propriedades térmicas foi realizada no LTC com o analisador térmico KD2 PRO, da Decagon Devices, ver figura 3.8 (A), cujo funcionamento baseia-se no método da fonte de calor linear transiente. Utilizou-se a sonda SH-1, recomendada pelo fabricante para materiais sólidos, ver figura 3.8 (B). O KD2 quando equipado com essa sonda nos fornece: condutividade térmica (k , W/m.K), resistividade térmica (r , °C.cm/W), difusividade térmica (α , mm²/s) e calor específico volumétrico (ρc_p , MJ/m³.K).



(A)



(B)

Figura 3.8. (A) Analisador térmico KD2 PRO, (B) Sonda SH-1.

Determinaram-se as propriedades térmicas em ambiente de temperatura controlada. Uma câmara de isolamento térmica fabricada em madeira e preenchida com flocos de material isolante, ver figura 3.9, foi utilizada para acondicionar os corpos de prova durante os testes.



Figura 3.9. Câmara preenchida com material isolante.

Os testes foram realizados de acordo com as orientações do fabricante do analisador térmico. Primeiramente foram abertos dois orifícios centrais em todos os corpos de prova para que a sonda de medição fosse inserida. No momento da análise a sonda foi recoberta de pasta térmica para facilitar o contato da sonda com o material e ainda proteger a mesma. Na sequência a sonda foi inserida no corpo de prova e posicionada dentro da câmara de isolamento térmico. Foram realizadas 3 medições em cada um dos corpos de prova, todas com duração de 10 minutos, com o propósito de assegurar uma maior precisão, e com 15 minutos de intervalo entre elas para que o gradiente térmico se dissipasse.

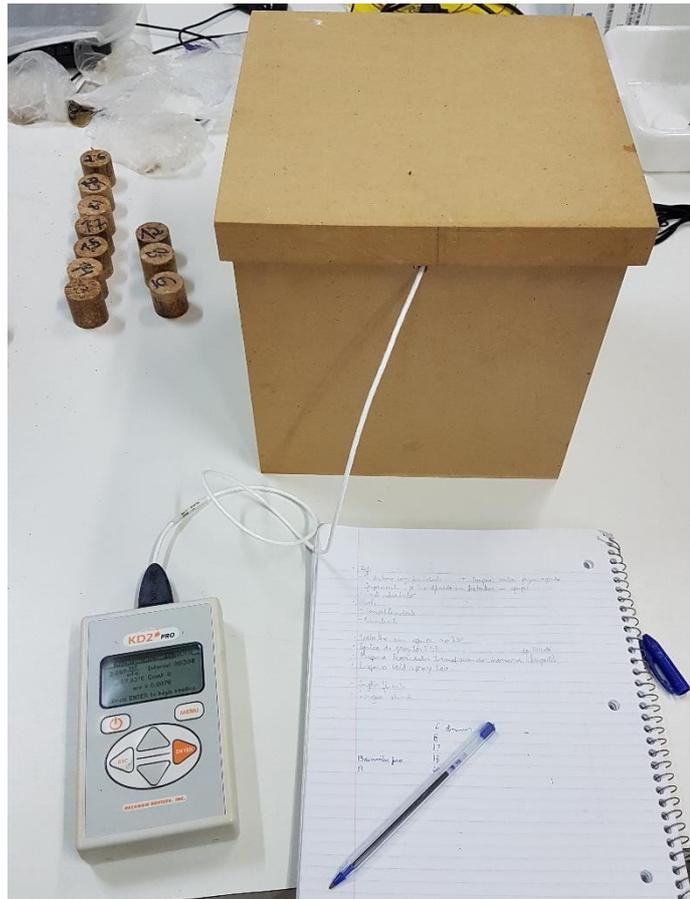


Figura 3.10. Medição das propriedades térmicas em andamento.

Após a obtenção dos dados foi realizada a análise da variância (ANOVA) para verificar a significância estatísticas dos dados, adotando-se um nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados colhidos da forma descrita nos procedimentos foram gerados os gráficos comparativos das médias das propriedades obtidas para às três diferentes pressões de compactação testadas.

4.1 Condutividade

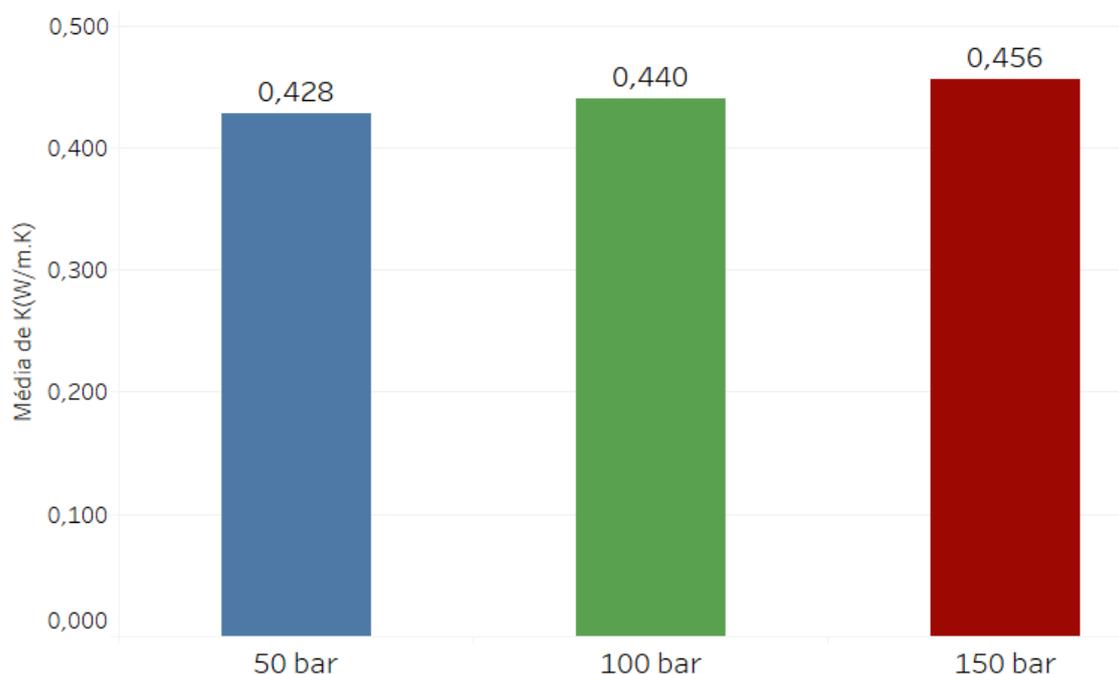


Figura 4.1. Comparativo das médias de condutividade térmica para as três pressões ensaiadas.

Os resultados da figura 4.1. mostram que a média de condutividade térmica para a pressão de compactação de 150 bar é cerca de 3,6% maior que para a pressão de 100 bar, e 6,5% maior que a condutividade térmica média da pressão de 50 bar. O teste de variância ANOVA resultou em um valor-p de 0,045, ou seja, os resultados obtidos de condutividade se mostraram estatisticamente significantes.

Sabendo que a condutividade expressa a velocidade com que o material transfere energia por meio da condução, pode-se dizer que dentre as pressões testadas os briquetes compactados à pressão de 150 bar teriam uma taxa de transferência de calor levemente maior durante o seu aquecimento e queima.

4.2 Resistividade

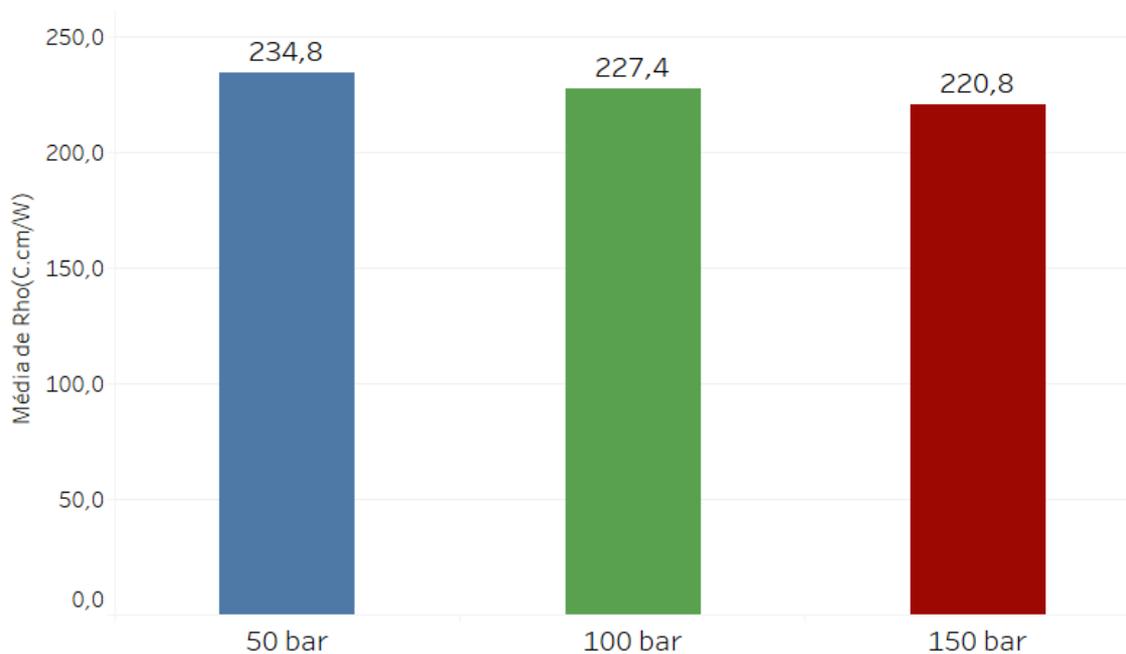


Figura 4.2 Comparativo das médias de resistividade térmica para as três pressões ensaiadas.

De acordo com os valores da figura 4.2 a resistividade térmica das amostras submetidas à pressão de 50 Bar é na média 3,2% maior do que a das amostras submetidas à 100 Bar. Que por sua vez é 3,0% maior do que a resistividade média das amostras submetidas à 150 Bar. Para esses dados o teste de variância ANOVA resultou em um valor-p de 0,086. Na metodologia deste teste quando o valor-p > 0,05, diz-se que os resultados obtidos não são significantes estatisticamente, ou seja, a diferença entre os resultados tem uma chance maior que 5% de terem ocorrido por fatores externos às variáveis em estudo.

4.3 Capacidade Calorífica Volumétrica

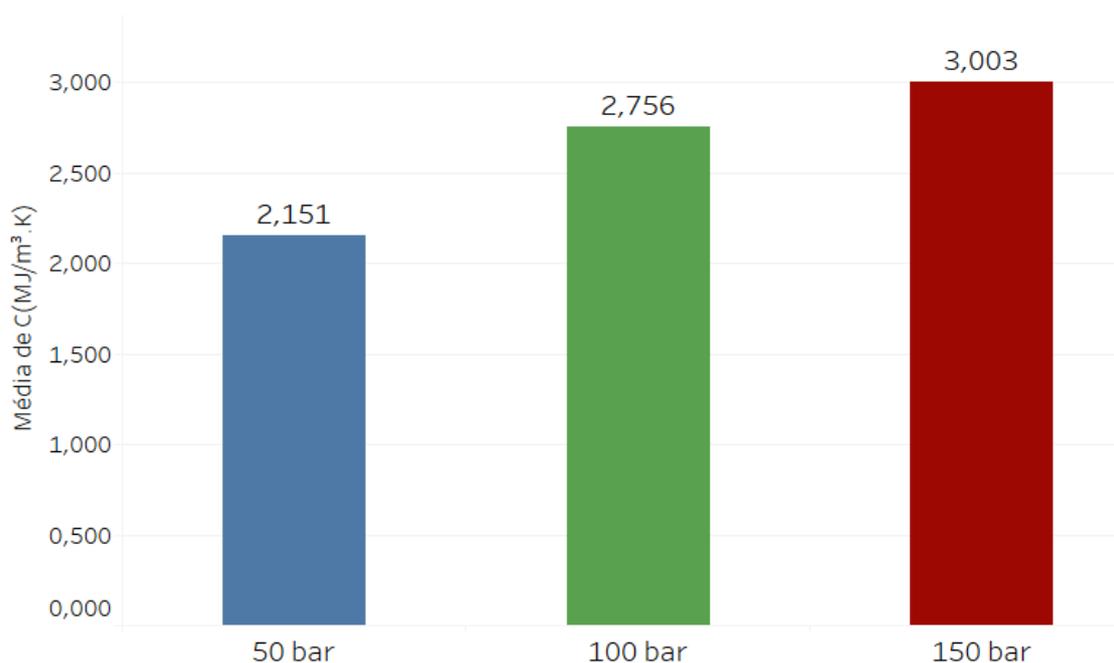


Figura 4.3. Comparativo das médias de capacidade calorífica volumétrica para as três pressões ensaiadas.

Segundo os valores da figura 4.3. a capacidade calorífica volumétrica das amostras compactadas à pressão de 150 bar é 8,9% maior que o das amostras compactadas a 100 bar, e 39,6% maior que o das amostras compactadas à 50 bar. Para esse resultado o teste de variância ANOVA resultou em um valor-p de 0,004, ou seja, o resultado é estatisticamente significativo.

Os dados corroboram a hipótese de que uma maior pressão de compactação resulta em um briquete com mais energia por metro cubico, fato que pode aumentar significativamente a efetividade do uso dos briquetes.

4.4 Difusividade

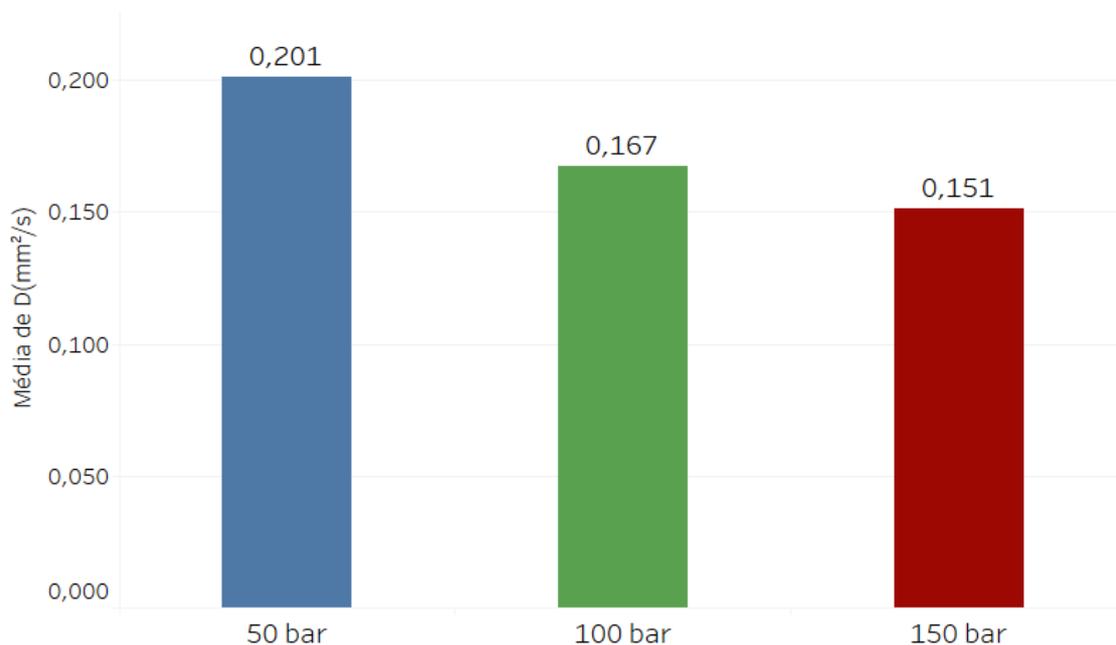


Figura 4.4. Comparativo das médias de difusividade térmica para as três pressões ensaiadas.

De acordo com os dados da Figura 4.4 a difusividade média das amostras briquetadas à 50 bar é 20% maior que a das amostras briquetadas à 100 bar e 33% maior que a das amostras briquetadas a 150 bar. O teste de variância ANOVA resultou em um valor-p de 0,015, atestando que os dados são estatisticamente significantes.

Os resultados nos mostram que a razão entre a capacidade de conduzir energia e a capacidade de armazená-la é significativamente maior nos briquetes compactados sobre uma menor pressão. Isso significa que os briquetes confeccionados sobre a pressão de 50 bar respondem mais rapidamente a mudanças na temperatura ambiente e conseqüentemente chegam mais rapidamente em um equilíbrio térmico.

5 CONCLUSÕES

O processo de preparação do bagaço da cana-de-açúcar se mostrou eficaz, o material permitiu o controle de Umidade como o previsto e o mesmo possuiu lignina o suficiente para que a briquetagem fosse realizada sem necessidade de adição de aglutinante.

O pó de bagaço de cana permitiu a briquetagem nas três pressões de compactação escolhidas, 50, 100 e 150 bar. Corroborando Brasil (2014) a viabilidade da utilização de resíduos sucroalcooleiros para a briquetagem foi confirmada.

A partir das análises das propriedades térmicas pode-se observar que as amostras compactadas à pressão de 150 bar obtiveram condutividade e capacidade térmica volumétrica consideravelmente maior que as demais amostras. Dessa forma, de acordo com Fontes (1984) a pressão de compactação de 150 bar seria a mais indicada dentre as pressões testadas, pois uma maior concentração energética do combustível aumenta a viabilidade econômica para uso do mesmo.

6 REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **A bioeletricidade da cana em números**. 2017. Disponível em: < www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=38583365 > Acesso em: 10/02/2018.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Brasília – DF. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em: 12/12/2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2014: ano base 2013**. Rio de Janeiro, 2014. 54p.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V. **CETEM: BRIQUETAGEM** – Cap. 15. CT2004-190-00 Comunicação Técnica elaborada para a 4a Edição do Livro de Tratamento de Minérios.p.613 - p.636. Rio de Janeiro. 2004.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

CONAB - Companhia nacional de abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar**, p. 1-74, Brasília, dez. 2016.

COSTA JR, D. S. da. **Qualidade de briquetes produzidos a partir de resíduos de bambu e serragem de madeira**. 2015. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional (BEN) 2017: ano base 2016**. Rio de Janeiro, 2017. 292p. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>

FIGUEIROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, out./dez. 2009.

FONTES, P. J. P. de; QUIRINO, W. F.; PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S. M. S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: DPQ/IBDF, 1984.

GALBIATTI, J. A. et. al. **Estudo qualiquantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, v.14, n.4, p.432–437, 2010.

GREENPEACE. **[R]evolução energética. A caminho de desenvolvimento limpo**. Conselho Europeu de Energia Renovável. 54p. 2010.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Relatório de pesquisa. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf> Acesso em: 06/02/2018

LIPPEL. **Planejando Uma Usina de Briquetagem**. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/usina_briquetagem.pdf>. Acesso em: 12/11/2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha energética Brasileira**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+_+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+_+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0> Acesso em : 22/02/2018.

MOTA, J. C.; ALMEIDA, M. M.; ALENCAR, V. C.; CURTI, W. F. **Características e Impactos Ambientais Causados Pelos Resíduos Sólidos: Uma Visão Conceitual**. 15p. 2009. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/21942/14313>>. Acesso em: 27/12/2017.

OLIVEIRA, E.; Vital B. R.; Pimenta, A. S.; Lúcia, R. M. D.; Ladeira, A. M. M.; Carneiro, A. de C. O. **Estrutura atômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora***. Revista Árvore, v.30, p.311-318, 2006.

OSHIRO, T. L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos**. 2016. 58p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

PAULA, L. E. de R. E. **Efeito da Torrefação e briquetagem nas propriedades energéticas de resíduos agroindustriais**. 2014. 88 p. Tese

(Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PISSANTI, D. R.; RECH, M. B. **Determinação do coeficiente de condutividade térmica**. 2010. 23 p. – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

QUIRINO, W. F. et al. **Influência da pressão e material nas propriedades de briquetes de biomassa florestal**. 4p.SD. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e Índice de Combustão de Briquetes de Carvão Vegetal**. Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA. Brasília, 1991. 19p.

Rocha, P. M. et al. **Geração de energia a partir de briquetes produzidos de pó de serragem de mdf (medium density fiberboard) proveniente de uma fábrica de móveis -biomassa**. 2015. Disponível em: <http://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/humanas_sociais_e_aplicadas/article/view/730> Acesso em : 22/02/2018.

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

Santos, M. L.; Lima, O. J.; Nassar, E. J.; Ciuffi, K.J.; Calefi, P. S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Revista Química Nova**, v.34, n.3, p. 507-511, 2011.

SILVA, D. A. da. et al. **Caracterização de biomassa para briquetagem**. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 713–722, dez. 2015.

VALE, A. T. et al. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos do grão de café (*Coffea arábica, L*) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), DUKE. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 416-420, out./dez. 2007.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de Biomassa e resíduos agroflorestais. In: **Tecnologias Aplicadas ao Setor madeireiro III**. P. 195-241. Rio Branco: Suprema, 2008.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da Biomassa Proveniente de Resíduos Agrícolas para geração de energia.** 56p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

7. Anexos

Como o auxílio do KD2 Pro foram obtidas as estimativas das propriedades térmicas das 3 pressões de compactação testadas, conforme mostrado nas tabelas 7.1 a 7.3.

Tabela 7.1 – Propriedades térmicas dos briquetes compactados a 50 bar.

Identificador da Amostra	K(W/m*K)	Rho(C*cm/W)	C(MJ/m ³ *K)	D(mm ² /s)	Err
1	0,463	216,0	2,502	0,185	0,0086
2	0,456	219,2	2,076	0,220	0,0092
3	0,400	249,8	1,820	0,221	0,0117
4	0,386	259,1	2,133	0,181	0,0107
5	0,426	234,7	1,914	0,222	0,0099
6	0,436	229,2	2,597	0,168	0,0098
7	0,425	235,4	2,013	0,211	0,0098
Média	0,428	234,8	2,151	0,201	-
Desvio Padrão	0,028	15,5	0,292	0,023	-

Tabela 7.2 – Propriedades térmicas dos briquetes compactados a 100 bar.

Identificador da Amostra	K(W/m*K)	Rho(C*cm/W)	C(MJ/m ³ *K)	D(mm ² /s)	Err
8	0,419	238,4	2,167	0,194	0,0084
9	0,436	229,3	2,958	0,165	0,0111
10	0,442	226,1	2,406	0,184	0,0076
11	0,449	222,7	2,515	0,179	0,0103
12	0,424	235,6	3,514	0,121	0,0075
13	0,458	218,5	3,374	0,136	0,0076
14	0,452	221,4	2,359	0,192	0,0097
Média	0,440	227,4	2,756	0,167	-
Desvio Padrão	0,014	7,4	0,530	0,029	-

Tabela 7.3 – Propriedades térmicas para os briquetes compactados a 150 bar.

Identificador da Amostra	K(W/m*K)	Rho(C*cm/W)	C(MJ/m ³ *K)	D(mm ² /s)	Err
15	0,479	208,9	3,286	0,147	0,0087
16	0,459	218,1	3,279	0,140	0,0076
17	0,450	221,0	3,076	0,124	0,0069
18	0,449	233,3	3,315	0,129	0,0080
19	0,457	218,6	2,275	0,201	0,0079
20	0,463	216,0	2,502	0,185	0,0086
21	0,436	229,5	3,290	0,133	0,0094
Média	0,456	220,8	3,003	0,151	-
Desvio Padrão	0,013	8,2	0,432	0,030	-