



LETÍCIA MACIEL SANT'ANA SIMÕES

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NAS
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E ENERGÉTICAS
DE BRIQUETES PRODUZIDOS COM FIBRA DE COCO**

LAVRAS – MG

2021

LETÍCIA MACIEL SANT'ANA SIMÕES

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS E ENERGÉTICAS DE BRIQUETES PRODUZIDOS
COM FIBRA DE COCO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira

Orientador

Me. Carine Setter

Coorientadora

LAVRAS -MG

2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Simões, Leticia Maciel Sant'Ana.

Influência do tamanho das partículas nas propriedades físico-
mecânicas e energéticas de briquetes produzidos com fibra de coco
/ Leticia Maciel Sant'Ana Simões. - 2021.

53 p. : il.

Orientador(a): Tiago José Pires de Oliveira.

Coorientador(a): Carine Setter.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Briquetagem. 2. Granulometria. 3. Biomassa. I. de Oliveira,
Tiago José Pires. II. Setter, Carine. III. Título.

LETÍCIA MACIEL SANT'ANA SIMÕES

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS E ENERGÉTICAS DE BRIQUETES PRODUZIDOS
COM FIBRA DE COCO**

**THE INFLUENCE OF THE SIZE OF THE PARTICLES ON THE PHYSICAL-
MECHANICAL AND ENERGY PROPERTIES OF BRIQUETTES PRODUCED
WITH COCONUT FIBER**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 12 de março de 2021

Dr. Rafael Farinassi Mendes – UFLA

Dr. João Moreira Neto – UFLA

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira
Orientador

Me. Carine Setter
Coorientadora

LAVRAS -MG

2020

*“Porque Deus é o que opera em vós tanto o querer quanto o efetuar, segundo a sua boa vontade.”
Filipenses 2:13*

Primeiramente a Deus que me permitiu alcançar lugares onde nunca imaginei chegar e aos meus pais, Juliana e Edmilson, que sempre me incentivaram a continuar mesmo em meio às dificuldades, sendo exemplos de força, resiliência, bravura e dedicação. Obrigada por todo amor e confiança depositados em mim! Fizeram toda a diferença nesse processo. Amo vocês.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Com toda a certeza em meu coração, o primeiro lugar de honra por eu ter chegado até essa etapa da minha vida pertence à Deus. Tanto o querer quanto o efetuar provêm Dele, de forma que hoje eu posso ver a Sua mão em todas as coisas, que sem exceção alguma foram usadas para o meu bem, conforme a boa, agradável e perfeita vontade do Pai. O meu coração só consegue sentir gratidão por todas as dificuldades que passei e que pela misericórdia de Deus foram usadas para me fazerem crescer e me tornar mais sábia, dependente e confiante hoje. Deus sempre foi o motivo de tudo, e para Ele eu tudo consagro!

Agradeço à minha mãe, Juliana, que desde sempre sonhou com um futuro brilhante para mim e não mediu esforços para me aconselhar e exortar de maneira que eu fizesse boas escolhas e trilhasse por bons caminhos. Se hoje estou aqui, foi pelas suas incessantes orações, desde quando eu ainda estava em seu ventre. Amo você!

Agradeço ao meu pai, Edmilson, que sempre foi um exemplo de perseverança, inteligência e resiliência para mim. Obrigada por todas as palavras sábias que me ajudaram a tomar decisões importantes. Obrigada por toda a confiança em mim. Amo você!

Agradeço ao meu irmão, Miguel Jorge, que sempre demonstrou sentir orgulho de mim e que foi um dos motivos pelos quais eu não desisti de caminhar. O meu desejo é continuar sendo um exemplo para você. Te amo!

Agradeço a todas as amigas que conquistei na graduação, em especial à Jéssica Trindade, Isadora Borges, Lívia Sanglard, Giovanna Andrade e Caio Guilherme. Vocês foram mais que meus amigos, foram a família que escolhi para estar comigo nessa etapa tão importante da minha vida. Nossa amizade não se restringe a 5 anos, é para sempre. Continuarei escolhendo vocês sempre!

Agradeço à minha igreja Vale das Bênçãos Church Lavras que me acolheu como filha quando eu mais precisei. Vocês são meu exemplo de amor, humildade, união, excelência e principalmente: vocês são meu exemplo de Cristo!

Agradeço a todos os meus professores da graduação, em especial ao meu orientador Tiago Pires, que sempre esteve presente, me auxiliando com o todo o conhecimento necessário e contribuindo para minha formação pessoal e profissional ao longo desses anos. Você é um exemplo de profissional para mim!

Agradeço também à minha coorientadora Carine Setter, que sempre caminhou muito perto de mim, sendo agradável, solícita e amiga. Sua ajuda fez com que essa etapa fosse mais leve e tranquila.

Obrigada por tudo!

“Seja boa, doce menina, e não se esqueça de ser o mais inteligente que puder”

(C. S. Lewis)

RESUMO

Briquetes são combustíveis sólidos produzidos a partir do adensamento de biomassas lignocelulósicas. Os mesmos concentram interesse em seu estudo graças à sua forma compacta que aglomera partículas pouco densas e sem formato específico, garantindo melhor logística de manuseio, transporte e armazenamento. Além disso, a briquetagem gera combustíveis sólidos de alta qualidade, com queima mais uniforme e estável em comparação à biomassa a granel. A disponibilidade de recursos naturais no Brasil, somada à necessidade por energias renováveis e ao uso já vigente de biomassas para fins energéticos em indústrias, torna a briquetagem uma boa alternativa para o consumo de energia de forma logística, acessível e com danos reduzidos ao planeta. De forma a analisar a qualidade de briquetes produzidos a partir de biomassa, é importante estudar as características do processo de briquetagem e da matéria-prima utilizada. O presente trabalho propôs a produção de briquetes de fibra de coco com diferentes tamanhos de partícula, para analisar a variação do comportamento das propriedades físico-mecânicas e energéticas desses briquetes. A matéria-prima (fibra de coco) foi caracterizada quanto à densidade a granel, análise química imediata, estrutural e poder calorífico superior. Os briquetes foram produzidos com diferentes tamanhos de partícula de fibra de coco: partículas mistas (sem classificação granulométrica (1º tratamento)); partículas entre 0,355 mm e 0,250 mm (2º tratamento) e partículas menores que 0,250 mm (3º tratamento). Os briquetes de fibra de coco foram produzidos em um sistema de compactação à temperatura de 120 °C sob pressão 15 MPa por 20 minutos. As propriedades físicas (densidade aparente e expansão volumétrica), mecânica (resistência à compressão diametral) e energética (densidade energética) dos briquetes de fibra de coco foram determinadas. A fibra de coco demonstrou ser um resíduo em potencial para a produção de briquetes e, posteriormente aplicações energéticas dado seu elevado teor de carbono fixo (23,11%) e lignina (40,13%). Os resultados demonstraram que o tamanho da partícula influenciou tanto na densidade aparente, como na expansão volumétrica, resistência mecânica e densidade energética. De modo geral, a densidade aparente e resistência à compressão diametral dos briquetes aumentou com a redução do tamanho da partícula, cujo 3º tratamento (fibras < 0,250 mm) apresentou maiores valores para ambas propriedades. A densidade energética obteve valores mais altos para os briquetes do 3º tratamento, com um aumento percentual de 340,51% quando comparado os valores da biomassa a granel com os briquetes. Os valores de expansão volumétrica no período de 72 horas não ultrapassaram 1,8%, sendo o menor valor encontrado para o 3º tratamento. De maneira geral, a compactação da fibra de coco reduziu aproximadamente 4 vezes o espaço volumétrico ocupado, em relação à fibra de coco a granel, comprovando os benefícios logísticos em se compactar a biomassa, tal fato foi refletido na densidade aparente dos briquetes em comparação com a densidade da fibra de coco a granel. A produção de briquetes com partículas menores (3º tratamento) provou ser possível obter briquetes com melhores qualidades físico-mecânicas e energéticas.

Palavras-chave: Briquetagem. Granulometria. Biomassa. Compactação.

ABSTRACT

Briquettes are solids fuels produced from the compaction of lignocellulosic biomass. They concentrate interest in their study due their compact form that gather lower density particles without specific shape, ensuring improvement in the logistics of handling, transport and storage. Besides that, the briquetting generates solid fuels of high quality, with uniform and stable combustion compared to bulk biomass. In Brazil, the natural's resources availability, the necessity of renewable energy and the use of biomass for energy purposes in industries, become the briquetting a good choice to consumption of energy in a logistic, accessible and sustainable way. To analyze the briquette's quality, it's important to study the characteristics of the briquetting process as well as the raw material utilized. This study proposed the production of briquettes of coconut fiber with different sizes of particle to analyze the variation of the physical-mechanical and energy properties of these briquettes. The raw material (coconut fiber) was characterized in terms of bulk density, proximate analysis and structural chemistry analysis. The briquettes were produced with different particle's size of coconut fiber: mixed particles (without granulometric classification; 1st treatment); particles between 0,355 and 0,250 mm (2nd treatment) and smaller than 0,250 mm (3rd treatment). The briquettes were produced in a compaction system at temperature of 120 °C and pression of 15 MPa, for 20 minutes. The physical (apparent density and volumetric expansion) mechanical (resistance to diametral compression) and energy properties (energy density) of coconut fiber's briquettes were determined. The coconut fiber proved to be a waste in potential to briquettes producing and to be used in energetics applications due its high content of fixed carbon (23,11%) and lignin (40,13%). The results showed that the particle's size influenced the apparent density, volumetric expansion, mechanical resistance and energy density. The briquette's apparent density and resistance to diametral compression increased with the reduction of the particle's size, because the 3rd treatment (fibers smaller than 0,250 mm) presented bigger values to both properties. The energy density obtained values higher for the briquettes of the third treatment, with a percentual increase of 340,51% when the bulk biomass is compared with the briquettes. The volumetric expansion values, in a period of 72 hours, didn't exceed 1,8%, and the smaller values were encountered in the 3rd treatment. The compaction of coconut fiber reduced, approximately, 4 times the volumetric space occupied when compared with the bulk coconut shell fiber. This proves the logistics benefits of biomass compaction and this could be shown in the comparison between the apparent density of briquettes and the coconut fiber's bulk density. The production of briquettes with smaller particle (3rd treatment) proved that is possible to get briquettes with better physical-mechanical and energy properties.

Keywords: Briquetting. Granulometry. Biomass. Compactation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura química da celulose.....	15
Figura 2 - Principais componentes da hemicelulose.....	16
Figura 3 - Álcoois precursores primários da lignina.....	17
Figura 4 – Fibra de coco: a) 1º Tratamento; b) 2º Tratamento; c) 3º Tratamento	26
Figura 5 – Produção de Briquetes: a) Prensa hidráulica; b) Molde cilíndrico em aço inox; c) Briquetes produzidos.....	28
Figura 6 – Ensaio Mecânico: a) Máquina universal de ensaios EMIC DL 30000 N; b) Briquete do 3º tratamento sendo ensaiado	29
Figura 7 – Expansão Volumétrica dos briquetes após a compactação.	36
Figura 8 – Resistência mecânica dos briquetes de fibra de coco.....	37
Figura 9 - Aumento da densidade energética em relação à densidade aparente	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas da fibra de coco	31
Tabela 2 – Características da fibra de coco e dos briquetes produzidos.	34
Tabela 3 -Densidade energética da biomassa a granel e dos briquetes de fibra de coco	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Geral.....	14
2.2	Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Biomassa.....	15
3.2	Fibra de Coco	18
3.3	Briquetes	19
3.3.1	Temperatura de briquetagem.....	21
3.3.2	Pressão de briquetagem	22
3.3.3	Tamanho das partículas	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	Coleta e preparo da biomassa.....	26
4.2	Caracterização da Biomassa.....	26
4.2.1	Análise Imediata	27
4.2.2	Análise Química Estrutural.....	27
4.2.3	Poder calorífico Superior (PCS).....	27
4.2.4	Densidade a Granel.....	28
4.3	Briquetagem.....	28
4.4	Propriedades Físicas dos Briquetes	29
4.5	Propriedades Mecânicas	29
4.6	Propriedades energéticas	30
4.7	Análises Estatísticas	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
5.1	Caracterização da Biomassa.....	31
5.2	Propriedades físicas da fibra de coco a granel e dos briquetes	33
5.3	Propriedades mecânicas	37

5.4	Densidade energética da fibra de coco e dos briquetes.....	39
6	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A busca por combustíveis renováveis é um assunto muito discutido e que concentra grande interesse, sendo caracterizado por ter um grande leque de opções. A biomassa lignocelulósica vem sendo amplamente utilizada nesse contexto, devido ao seu potencial energético.

A biomassa pode ser definida como qualquer matéria orgânica que tem a possibilidade de ser transformada em energia térmica, elétrica ou mecânica (SANTOS et al., 2017), possuindo em sua composição três principais constituintes: celulose, hemicelulose e lignina. Segundo Santos et al. (2017), a biomassa possui um grande potencial de crescimento como fonte de produção de energia nos próximos anos, sendo ainda muito utilizada como fonte de energia elétrica e térmica a partir da madeira e resíduos agrícolas em vários lugares do mundo.

Nesse contexto gradativo de utilização de biomassas para a obtenção de energias renováveis, a fibra de coco é uma boa alternativa, uma vez que as fibras vegetais são materiais renováveis e de baixo custo (GONÇALEZ, 2016). A fibra de coco, além de possuir tais características, também possui bom desempenho, baixo custo para ser processada e diversidade de uso (TAKAHASHI, 2009).

O mercado de coco-verde, no Brasil, tem crescido nos últimos anos. Estima-se que, a produção brasileira no ano de 2020 foi correspondente a 2,86 milhões de toneladas de cocos, gerando uma quantidade de 2,01 milhões de toneladas de resíduos (BRAINER; XIMENES, 2020), que podem chegar a até 85% do peso bruto do coco verde (ROSA et al., 2001). A casca de coco, caracterizada como esse resíduo provindo do uso e da industrialização da água de coco, é depositada em aterros sanitários e lixões (GONÇALEZ, 2016), o que gera acúmulo de lixo e até mesmo impactos à sociedade, uma vez que a casca de coco leva, em média, 8 anos para se decompor completamente (CARRIJO; LIZ; MAKISHIMA, 2002). Assim, o uso da fibra de coco como fonte de energia se apresenta duplamente viável, primeiro pela redução de resíduos dispostos no meio ambiente, e, segundo, por ser uma fonte de energia renovável.

As tecnologias que extraem a energia da biomassa usam resíduos ou material vegetal para produzir energias que emitem menores níveis de gases de efeito estufa do que as fontes de energia a partir de combustíveis fósseis (SHEEHAN et al., 1998). Esses resíduos, em forma dispersa, apresentam queima não uniforme e baixa densidade, todavia, apresentam a capacidade de serem compactados antes de realizada a extração de sua energia, tendo seu volume reduzido

de cinco a dez vezes, variando em relação ao tipo de biomassa utilizada, produzindo combustíveis sólidos com maior densidade e durabilidade (YAMAJI et al., 2013), conhecidos como briquetes.

O processo de compactação ou adensamento da biomassa ocorre a partir da aplicação de pressão sobre partículas a granel, tornando-as um sólido compacto e de alta densidade que possui diversos benefícios, como: facilidade de manipulação e armazenamento, maior concentração de energia por unidade de volume, maior homogeneidade e maior controle sobre o processo de combustão (LÚCIA DE MORAES et al., 2017). Os briquetes gerados a partir do processo de compactação possuem características que influenciam de forma direta na sua aplicação como combustível sólido e, sendo assim, é imprescindível ter conhecimento de suas propriedades físicas, mecânicas e energéticas (SETTER, 2020).

Segundo Samuelsson et al. (2012), a qualidade de briquetes como combustíveis sólidos está atrelada à sua densidade aparente e resistência mecânica. Por sua vez, as características mecânicas dos briquetes são dependentes do tamanho e estrutura das partículas da biomassa utilizada (BERGSTRÖM et al., 2008). Já a densidade dos briquetes, é influenciada pelo tamanho das partículas, pelo tempo de briquetagem, temperatura e pressão de compactação (KERS et al., 2010).

Diante disso, fica clara a interferência direta do tamanho das partículas na qualidade dos briquetes produzidos, fazendo-se necessário um estudo mais aprofundado dessas interferências nas propriedades finais do briquetes produzidos e em sua qualidade. O presente estudo abrangeu a influência de três tipos de tamanhos de partículas sobre briquetes produzidos a partir da fibra de coco. Com a redução do tamanho das partículas utilizadas esperou-se obter briquetes com maior qualidade e resistência mecânica.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O trabalho realizado teve como objetivo produzir briquetes a partir do aproveitamento de resíduos de coco (fibra de coco) com diferentes tamanhos de partícula e avaliar suas propriedades físico-mecânicas e energéticas.

2.2 Específicos

- Caracterizar as propriedades físico-químicas (análise química estrutural e análise química imediata) e o poder calorífico superior da fibra de coco;
- Produzir briquetes com diferentes granulometrias: partículas mistas (sem classificação granulométrica); partículas menores que 0,355 mm e maiores que 0,250 mm; e partículas menores que 0,250 mm;
- Caracterizar as propriedades físico-mecânicas e energéticas dos briquetes produzidos com fibra de coco;
- Avaliar a influência das diferentes granulometrias nas propriedades físico-mecânicas e energéticas dos briquetes.

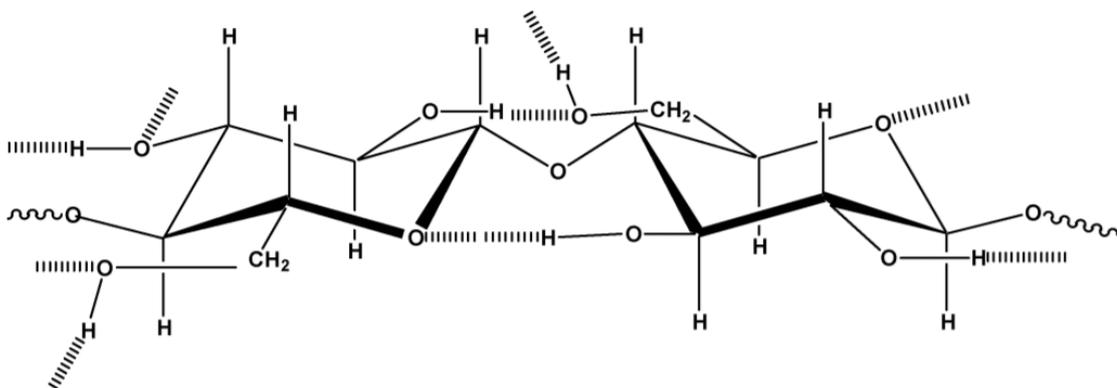
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa

A biomassa é a fonte carbono mais renovável quando comparada às outras (CARDOSO, 2012), sendo definida como um material composto por hidrocarbonetos que consiste, basicamente, em carbono, oxigênio e nitrogênio, podendo conter enxofre e também proporções significativas de espécies inorgânicas (YAMAN, 2004). Os resíduos de biomassa podem ser exemplificados como resíduos de madeiras, fibras, bagaços, resíduos da agricultura e de indústrias, restos de animais dentre outros. Os componentes da biomassa lignocelulósica se subdividem em três principais, sendo eles: celulose, hemiceluloses e lignina. Além desses, também há presença de outros como: extrativos, lipídios, proteínas, açúcares simples, amidos, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros compostos (BALAT et al., 2009).

A celulose, cuja estrutura química está representada na Figura 1, é primeiro principal componente químico da biomassa. A unidade básica de repetição do polímero de celulose consiste em duas unidades de anidrido de glicose, que são chamadas de unidade de celobiose (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006). A celulose forma ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares devido aos grupamentos OH presentes ao longo de sua estrutura, dessa forma as cadeias de celulose tendem a se dispor paralelamente umas às outras formando uma estrutura cristalina com pacotes de cadeias lineares de celulose conhecidas como microfibrilas (DEMIRBAS, 2008b; HASHEM et al., 2007). A degradação da celulose ocorre em temperaturas entre 240 e 350 °C produzindo anidrocélulose e levoglucosana (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006).

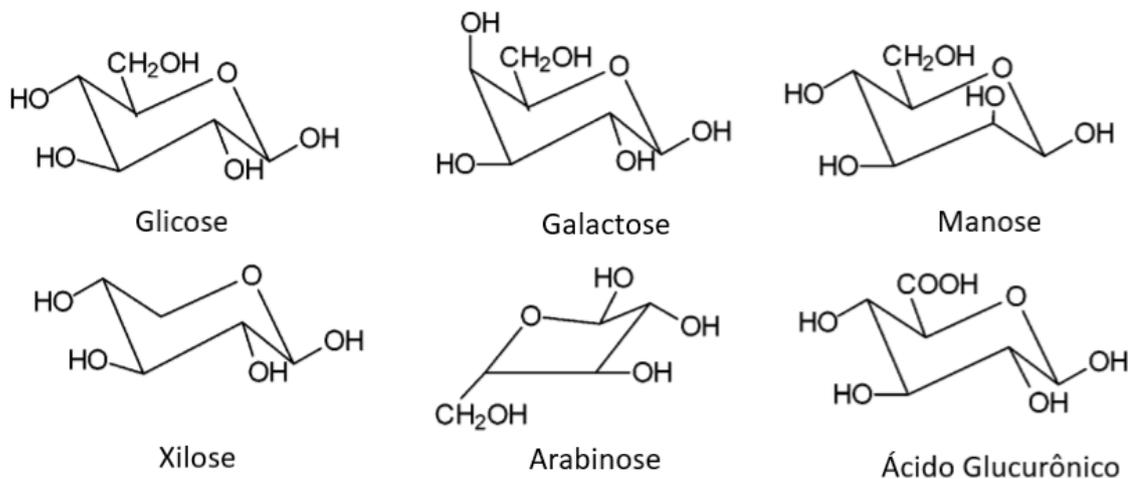
Figura 1 - Estrutura química da celulose



Fonte: Mohan, Pittman e Steele (2006)

O segundo principal componente químico da biomassa são as hemiceluloses, que ocorrem em cadeias moleculares muito mais curtas que a celulose (DEMIRBAS, 2008a), sendo uma mistura de monossacarídeos polimerizados, como a manose, glicose, xilose, galactose, ácido 4-O-metil glucurônico, arabinose e resíduos de ácido galacturônico (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006), representados na Figura 2. Os pesos moleculares das hemiceluloses são bem mais baixos do que os da celulose (BALAT et al., 2009). A hemicelulose se decompõe a temperaturas entre 200 e 250 °C (SOLTES; ELDER, 1981).

Figura 2 - Principais componentes da hemicelulose

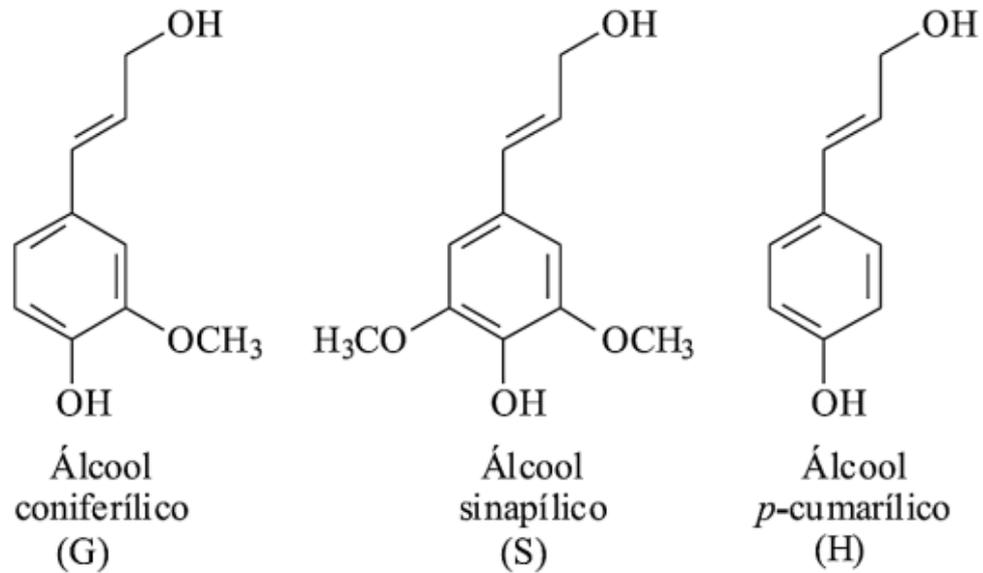


Fonte: Adaptado de Mohan, Pittman e Steele (2006)

O terceiro principal componente químico da biomassa é a lignina, caracterizada por ser um produto amorfo de resina reticulada e sem estrutura exata, que funciona como a pasta principal para a aglomeração de compostos celulósicos fibrosos ao mesmo tempo que fornece uma proteção contra micróbios e fungos que possivelmente poderiam atuar na destruição das fibras celulósicas (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006). É constituída por monômeros de guacilpropano (G), siringilpropano (S) e phidroxifenilpropano (H), sendo estes originados a partir da polimerização desidrogenativa dos álcoois precursores: trans-coniferílico, trans-sinapílico e trans-para-cumárico (PHILIPP e D'ALMEIDA, 1998), que estão representados na Figura 3.

A lignina se decompõe quando submetida a temperaturas entre 280 e 500 °C (SOLTES; ELDER, 1981) e, em relação à celulose e hemicelulose, é mais difícil de degradar (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006).

Figura 3 - Álcoois precursores primários da lignina



Fonte: Barbosa et al. (2008)

Nos últimos tempos, a biomassa vem sendo valorizada como fonte de energia, se desenvolvendo como uma forma alternativa para minimizar os impactos ambientais, bem como a geração de resíduos (SILVA et al., 2015). Segundo Goldemberg e Lucon (2007), o Brasil é um país que já se destaca nesse ramo, graças a seu programa de biomassa moderna no setor de transportes baseado no etanol. Além disso, o país possui uma oferta expressiva de biomassa como recurso energético, devido à produção agrícola, agroindustrial e silvicultural (SANTOS et al., 2017).

O Brasil possui diversas vantagens na liderança do setor de energias renováveis a partir da biomassa quando comparado a outros países, uma vez que possui condições naturais e geográficas favoráveis, além de características adequadas de solo e condições climáticas (SANTOS et al., 2017).

Sendo definida como uma fonte bioenergética, a biomassa compensa as emissões de combustíveis fósseis (LAL, 2005), além de compensar as suas próprias emissões quando queimada. O mesmo pode ser explicado a partir do processo de fotossíntese, que se utiliza principalmente do gás carbônico e luz solar, armazenando energia que virá a ser emitida no meio ambiente novamente, devido ao processo de queima da biomassa. Esse ciclo impede o acúmulo de gás carbônico na atmosfera, dando assim, credibilidade ao uso de biomassa para fins energéticos.

Em termos de potencial energético de produtos provindos da biomassa, tanto a tecnologia empregada para a obtenção dos energéticos quanto a matéria-prima utilizada são fatores de interferência (ANEEL, 2008)

3.2 Fibra de Coco

A crescente preocupação com o meio ambiente tem impulsionado o uso de recursos renováveis, e, nesse contexto, o uso de fibras vegetais se torna uma boa alternativa, por ser um material renovável e de baixo custo (GONÇALEZ, 2016).

As fibras vegetais possuem baixo custo e densidade, maciez e abrasividade reduzida, reciclabilidade, atoxicidade, biodegradabilidade e baixo consumo de energia em sua produção (NETO; PARDINI, 2006). Dessa forma, podem ser utilizadas como matéria-prima para diversas finalidades, contribuindo assim para a redução de resíduos dispostos no meio ambiente e também para a mitigação de impactos ambientais.

No Brasil, o consumo da água do coco-verde é cada vez maior, principalmente no verão, ao longo de todo o litoral. Estima-se que, em 2020, o Brasil produziu em torno de 2,86 milhões de toneladas de cocos (BRAINER; XIMENES, 2020). Esse consumo crescente traz como consequência imediata uma grande produção de resíduo sólido, cerca de 2,01 milhões de toneladas anuais de resíduos de cocos-verdes (BRAINER; XIMENES, 2020), formado pelas cascas fibrosas dos cocos e, segundo Carrijo, Liz e Makishima (2002), esse material apresenta baixa taxa de degradação, levando mais de oito anos para sua completa decomposição. Além disso, o peso bruto do resíduo de coco-verde descartado após o consumo pode chegar a até 85% do valor do coco verde inicial (ROSA et al., 2001), fator este que caracteriza o volume de resíduo gerado afirmado anteriormente. Sendo assim, o uso dessas fibras pode levar à produção de materiais com valor agregado, além de contribuir para a diminuição do lixo sólido (ISHIZAKI et al., 2006).

O coqueiro é uma cultura de países tropicais, estando presente ao longo da faixa costeira entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, mais especificamente nos continentes Asiático, Africano, na América Latina e na região do Pacífico (SIQUEIRA et al., 2002). Segundo o mesmo autor, o coqueiro é cultivado em 86 países ocupando uma faixa de 11,6 milhões de hectares.

A fibra de coco é uma fibra lignocelulósica obtida do mesocarpo fibroso do coco, fruto do coqueiro (*Cocos nucifera* L.) cultivado largamente nos trópicos (ISHIZAKI et al., 2006).

Podem ser caracterizadas pela sua dureza e durabilidade, isso, devido ao alto teor de lignina, quando comparadas com outras fibras naturais (CORRADINI et al., 2009). Além de possuir tais características, a fibra de coco-verde (*Cocos nucifera* L.) possui baixo custo de processamento, bom desempenho e diversidade de uso (TAKAHASHI, 2009).

Ferreira et al. (2016) fizeram a caracterização energética da fibra de coco, para posterior produção de briquetes. Como resultados, obtiveram bons parâmetros de caracterização energética, tais como baixo teor de umidade, elevado teor de voláteis, baixo teor de cinzas, alto teor de carbono fixo e poder calorífico superior elevado. Os briquetes produzidos também obtiveram bom comportamento nos testes de resistência à compressão, o que caracterizou a fibra de coco como uma excelente matéria-prima para a geração de energia. Esteves, Abud e Barcellos (2015) também chegaram a uma conclusão semelhante à de Ferreira et al. (2016), em seus estudos sobre a avaliação do potencial energético das cascas de coco verde para aproveitamento na produção de briquetes.

3.3 Briquetes

Alternativamente aos combustíveis sólidos convencionais (lenha e carvão), a queima de resíduos como serragens, fibras, galhos, bagaços de cana e outros fornece o montante energético necessário para a geração de calor (YAMAJI et al., 2013). Todavia, a queima direta desses resíduos possui algumas desvantagens como baixa densidade, o que dificulta as operações de transporte e armazenamento; e elevada umidade, no qual grande parte da energia fornecida pela combustão é consumida durante a secagem da biomassa, reduzindo sua eficiência energética (SILVA; ROCHA, 2007).

A briquetagem é um método que eficientemente eleva a densidade da biomassa a partir do processo de compactação, permitindo haver maior concentração de energia por unidade de volume (PARIKKA, 2004). De acordo com Quirino e Brito (1991), no processo de briquetagem, a biomassa pode vir acompanhada ou não de ligantes.

O processo de adensamento ou compactação da biomassa envolve etapas de secagem, fragmentação com o intuito de adequar as dimensões das partículas, tratamento térmico e pressão mecânica para promover a redução de volume (LÚCIA DE MORAES et al., 2017). Em grau microscópico, segundo Panda et al. (2015), durante a briquetagem, ocorre um rearranjo das partículas seguido por sua deformação. De modo semelhante Mani et al. (2006), propôs uma ordem onde: a distância entre partículas é reduzida, as partículas se tornam deslocadas,

deformadas, sofrem deformação plástica e por fim são unidas por forças de ligação. De maneira geral, segundo Lúcia de Moraes et al. (2017), as principais operações de compactação são denominadas de peletização e briquetagem, sendo ambas relacionadas às dimensões do material gerado, diferindo-se pelo tamanho do mesmo. A peletização e briquetagem são caracterizadas como os processos mais utilizados para produção de combustíveis sólidos.

Devido ao adensamento da biomassa, com a redução do espaço físico, existe a vantagem de se transportar maior volume de massa e, portanto, de energia (YAMAJI et al., 2013). Também segundo Yamaji, et al. (2013), a biomassa, quando compactada, resulta em briquetes com alta densidade, forma adequada e umidade reduzida, todavia, o tipo de matéria prima, bem como as condições de armazenamento e parâmetros do processo de produção influenciam diretamente na qualidade do produto. A compactação também proporcionará materiais de constituição mais homogênea, o que resulta em uma queima do material de maneira mais uniforme e controlada (PAULA et al., 2011).

A umidade da biomassa que passará por compactação interfere na produção dos briquetes, uma vez que, a água ajuda a promover as forças de Van der Waals, aumentando a área de contato das partículas (GROVER; MISHRA, 1996), todavia, altas umidades podem impedir o achatamento completo e a liberação de aglutinantes naturais das partículas, devido à incompressibilidade da água (PICKARD; ROLL; RAMSER, 1961). Além disso, constituintes como lignina, caracterizados por serem ligantes naturais, podem ser amolecidos ou derretidos localmente devido à alta umidade ou temperaturas elevadas, de forma a evidenciar sua capacidade de ligação (KALIYAN, 2008, KALIYAN; MOREY, 2009). Segundo Quirino (1991) e Lucena et al. (2008) os teores de umidade adequados para o processo de compactação da biomassa abrangem uma faixa de 10 a 12%. Semelhantemente, Köser et al. (1982) obteve a qualidade máxima do briquete quando os teores de umidade do aguapé estiveram dentro da faixa de 8-12%.

O tempo de compactação também é um fator importante para o processo de briquetagem. Segundo Freitas et al. (2016), à medida em que o tempo de compactação aumenta, há uma tendência de aumento na densidade aparente dos briquetes. Essa mesma relação também foi avaliada por Dermibas e Sahin (1998). Todavia, o tempo de briquetagem deve ser o mais curto possível, de forma a garantir eficiência de produtividade (WANG; WU; SUN, 2018).

A utilização dos briquetes pode ser dada tanto em aplicações industriais quanto residenciais, seja em fornos domésticos, gaseificação em forno de leito fluidizado, caldeiras e

usinas de energia (LIU; QUEK; BALASUBRAMANIAN, 2014). Em relação à qualidade final de briquetes produzidos a partir de materiais lignocelulósicos, caracterizações química, física e mecânica são necessárias para sua avaliação (PROTÁSIO et al., 2011). Segundo Rabier et al. (2006), a densidade aparente é um parâmetro utilizado para a verificação da qualidade do briquete.

O ensaio de resistência à compressão dos briquetes é utilizado para medir a eficácia das ligações criadas entre as partículas durante o processo de densificação, podendo ser determinado como a carga máxima de esmagamento que o briquete suporta até sofrer alguma rachadura ou quebrar (KALIYAN; MOREY, 2009). De acordo com os mesmos autores, esse teste de resistência simula o estresse compressivo devido ao peso dos briquetes superiores nos briquetes inferiores durante seu armazenamento.

De maneira geral, de forma a se obter um processo de briquetagem eficiente e gerador de briquetes de qualidade, é necessário que parâmetros como temperatura e pressão de compactação estejam bem ajustados, além disso, o tamanho das partículas da biomassa a granel deve ser o mais conveniente.

3.3.1 Temperatura de briquetagem

Temperatura é um parâmetro muito importante utilizado na produção de briquetes. Geralmente, as temperaturas do processo de compactação se encontram acima de 120 °C (KALIYAN; MOREY, 2009), dependendo da biomassa utilizada. A alta temperatura é um fenômeno desejável, segundo muitos pesquisadores, uma vez que, em caso de biomassas com baixa umidade, permite que o briquete seja endurecido, obtendo-se maior densidade (NUREK et al., 2019). Segundo Tumuluru et al. (2011), a temperatura influencia significativamente em atributos de qualidade de briquetes como durabilidade e densidade aparente.

Castellano et al. (2015) presumiram que a compactação da biomassa ocorre em função de variados mecanismos de ligação entre as partículas, sendo que esses mecanismos são favorecidos pelo comportamento dos componentes químicos da biomassa quando submetidos a altas pressões e temperaturas. Segundo Chen et al. (2009), altas temperaturas no processo de briquetagem fazem com que a lignina do material lignocelulósico se torne plástica, atuando como ligante natural das partículas. Irvine (1984) verificou que a lignina é um material termoplástico amorfo que sofre deformação plástica a baixas pressões para temperaturas situadas na faixa de sua temperatura de transição vítrea, entre 60 e 90°C. Dessa forma, a

temperatura do processo de briquetagem, ao atingir os valores de transição vítrea da lignina promove o seu amolecimento causando uma deformação plástica das partículas, reduzindo sua viscosidade de forma a aumentar a sua mobilidade. Assim, as áreas de ligação ocorridas pela difusão de cadeias e pela proximidade de uma fibra com outra adjacente são facilitadas (IRVINE, 1984). No processo de resfriamento, a lignina endurece novamente e as ligações se consolidam, formando pontes sólidas (BACK, 1987), fazendo com que os briquetes se tornem fortes e duráveis (KALIYAN; MOREY, 2010).

Estudando os mecanismos de ligação em briquetes de *Panicum virgatum* (gramínea) e palha de milho, Kaliyan e Morey (2010) relataram que as ligações ocorridas entre as partículas se deram principalmente pela ação de ligantes naturais, como a lignina e proteínas, na formação de pontes sólidas. Esses ligantes foram amolecidos devido à temperatura fornecida ao processo formando uma ligação partícula-partícula durável. Além disso, foram utilizadas temperaturas entre de 75 e 100 °C, faixa de transição vítrea da lignina, e também temperaturas de 150°C na produção desses briquetes, sendo que a durabilidade encontrada para os briquetes produzidos dentro da faixa de temperatura da transição vítrea foram maiores em comparação com aqueles produzidos fora da faixa.

Nurek et al. (2019), semelhantemente em seus estudos com briquetes feitos de resíduos de perfilagem triturados, comprovou a influência da temperatura pelo fato de que seus briquetes apresentaram maior densidade e durabilidade à temperatura de 73 °C do que quando foram submetidos à temperatura de 22 °C. De maneira geral, ao fornecer uma temperatura na faixa de transição vítrea de ligantes naturais com a lignina, permite-se a sua ativação possibilitando a produção de produtos densificados duráveis (KALIYAN; MOREY, 2010).

3.3.2 Pressão de briquetagem

A pressão do processo de briquetagem é um parâmetro de extrema importância e influência para a qualidade final do briquete, uma vez que esta permite diferentes mecanismos de ligação entre as partículas da biomassa utilizada (KALIYAN; MOREY, 2009). A depender do tipo de biomassa a ser compactada, existe a possibilidade de redução de volume de 5 a 10 vezes, com o uso de pressão (YAMAJI et al., 2013). Geralmente, as pressões imprimidas no processo de compactação devem estar acima de 8 MPa (KALIYAN; MOREY, 2009).

Um aumento de pressão promove deformações plásticas e elásticas, difusão de moléculas e também um preenchimento de espaço vazios entre as partículas (MUAZU;

STEGEMANN, 2015). Segundo Kaliyan e Morey (2009), em altas pressões, alguns componentes naturais de ligação, como amido, lignina, proteínas e pectinas, são espremidos para fora das partículas, contribuindo para que as ligações entre elas ocorram.

As características físicas dos briquetes também são afetadas pela pressão. De acordo com Križan (2007), há uma relação entre pressão e densidade dos briquetes, na qual briquetes mais densos são formados a partir de pressões de compactação maiores. O mesmo autor, através de seus estudos sobre fatores de influência em briquetes de madeira, chegou à conclusão que o aumento da pressão no processo de compactação ocasiona em briquetes com maior resistência mecânica. Muazu e Stegemann (2015), semelhantemente, concluíram em seus estudos sobre efeitos das variáveis operacionais na durabilidade de briquetes de casca de arroz e espiga de milho que maiores pressões tiveram um efeito positivo na resistência à compressão dos briquetes.

Sendo assim, com o alto gasto de energia no processo devido a aplicações de pressões elevadas na produção de briquetes, esforços vêm sendo direcionados para a melhoria da qualidade de briquetes produzidos com baixas pressões (MUAZU; STEGEMANN, 2015). Na maioria das vezes, altas pressões e temperaturas são mais bem vistas uma vez que melhoram os mecanismos de ligação entre as partículas (CHOU; LIN; LU, 2009; FAVORODE; O'CALLAGHAN, 1987; SUHARTINI; HIDAYAT; WIJAYA, 2011), isso, porque a aplicação de baixas pressões requer a necessidade da presença de ligantes, de forma a garantir a coesão suficiente e durabilidade do briquete (YANK; NGADI; KOK, 2016).

De maneira geral, segundo a revisão feita por Nurek et al. (2019), as pressões usadas no processo de briquetagem podem variar entre 5-17 MPa, 30-60 MPa ou podem ser maiores que 100 MPa, sendo que, essa variação de valores aplicados pode ser explicada pela irregularidade e tamanho da partícula, bem como pelo tipo e umidade da biomassa utilizada. Nesse contexto, de acordo com Kers et al. (2010), briquetes produzidos com pressões entre 30 e 60 MPa (baixas pressões) possuem baixa qualidade, uma vez que se despedaçam facilmente. Em contrapartida, briquetes produzidos a partir de pressões entre 150 e 250 MPa (altas pressões) são consistentes e compactados, apresentando ótima qualidade.

3.3.3 Tamanho das partículas

Outro parâmetro importante é a granulometria do material, que interfere na compactação do mesmo, obtendo como resultado valores diferentes de força máxima suportada pelos briquetes (SILVA et al., 2015). Segundo Kers et al. (2010), o tamanho das partículas utilizadas na produção

dos briquetes interferem no poder de compactação do mesmo, em sua homogeneidade, estabilidade, nas ligações entre partículas, na pressão de compactação e principalmente na qualidade do briquete. O tamanho das partículas também é um fator de influência do processo de secagem da biomassa utilizada.

De acordo com Tumuluru e Wright (2010), a densidade e durabilidade (resistência mecânica) dos briquetes está relacionada de forma indiretamente proporcional ao tamanho das partículas. Geralmente, partículas menores são mais recomendadas, uma vez que o espaço vazio é reduzido entre as mesmas facilitando a formação de ligações mais fortes durante a prensagem da biomassa (SETTER et al., 2020). Segundo Setter (2020), a porosidade de briquetes feitos com partículas de menor granulometria tende a ser menor, e, portanto, a densidade tende a ser mais elevada. Além disso, partículas menores possuem uma maior área superficial para se ligarem, resultando na produção de briquetes com maiores densidades (MITCHUAL; FRIMPONG-MENSAH; DARKWA, 2013). Por outro lado, a presença de partículas grandes, no briquete, causam pontos de fissura, gerando rachaduras e fraturas no material (MACBAIN; REYNOLDS, 1967). Todavia, apesar dos benefícios proporcionados pela partículas finas, a moagem das mesmas torna o custo inviável (KALIYAN; MOREY, 2009). Portanto, para a obtenção de um produto final de melhor resistência mecânica, o ideal seria a mistura de partículas de diferentes granulometrias, de forma a possibilitar melhor acondicionamento das mesmas (BRAND et al., 2017).

Ligantes naturais, como proteínas e lignina também possuem um importante papel na ligação entre partículas e a redução do tamanho das partículas pode ocasionar em melhor fluxo dos ligantes, além disso, partículas de menor tamanho proporcionam melhor intertravamento mecânico entre fibras e partículas (KIRSTEN et al., 2016).

De acordo com Wang, Wu e Sun (2018) em seus estudos sobre o efeito do tamanho das partículas no processo de briquetagem da palha de arroz, partículas menores produziram briquetes com maior densidade e resistência à compressão. A mistura de partículas menores ao conteúdo de partículas maiores também produziu briquetes mais densos e resistentes quando comparados aos briquetes produzidos apenas com partículas de tamanho maior e semelhante.

Semelhantemente, Setter et al. (2020) ao estudar a influência do tamanho das partículas nas propriedades físico-mecânicas e energéticas de briquetes produzidos com casca de café, concluiu que a redução do tamanho das partículas ocasionou na formação de briquetes com maior

resistência mecânica e densidade, além de possuírem, também, melhores propriedades energéticas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Coleta e preparo da biomassa

Os briquetes foram confeccionados com a fibra de coco fornecida pela UEPAM – Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira – localizada na Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil. A fibra foi previamente moída em um moinho martelo com o intuito de promover sua separação e, posteriormente, classificada em peneiras granulométricas de 42 e 60 *mesh*, de forma a se obter o tamanho de partículas desejado para a compactação. Os briquetes foram confeccionados com diferentes tamanhos de partículas: partículas mistas (1º tratamento – partículas sem classificação granulométrica), partículas passantes pela peneira de 42 *mesh* e retidas na de 60 *mesh* (2º tratamento – partículas entre 0,355 mm e 0,250 mm) e partículas passantes pela peneira de 60 *mesh* (3º tratamento – partículas menores que 0,250 mm), conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Fibra de coco: a) 1º Tratamento; b) 2º Tratamento; c) 3º Tratamento



Fonte: Do autor (2021)

4.2 Caracterização da Biomassa

Para a caracterização química imediata, química estrutural e o poder calorífico da biomassa, inicialmente, foi realizado o peneiramento da fibra de coco, utilizando o método de análise por peneiras padronizadas de acordo com a norma ABNT NBR NM 248/2003 com auxílio do peneirador vibratório e peneiras de 40 *mesh* e 60 *mesh*, localizados no laboratório de Processos de Separação Mecânica da Universidade Federal de Lavras (LPSM). Os ensaios foram feitos em triplicata.

4.2.1 Análise Imediata

A análise imediata é composta pelos testes de umidade (TU), teor de materiais voláteis (MV), teor de cinzas (TC) e teor de carbono fixo (CF). Para as análises de teor de cinzas e teor de voláteis os cadinhos de porcelana foram calcinados e o material foi previamente seco.

A caracterização da análise química imediata foi avaliada de acordo com a norma ASTM D1762-84 (American Society for Testing Materials). A análise imediata foi realizada no Laboratório de Operações e Sistemas Térmicos (LOST) da Universidade Federal de Lavras. Desse modo, foi possível conhecer algumas propriedades que influenciam no potencial energético do material combustível e avaliar o potencial aproveitamento desses resíduos para a produção de biocombustíveis sólidos (briquetes).

4.2.2 Análise Química Estrutural

Para a análise química estrutural, foi determinado o teor de extrativos totais, teor de lignina solúvel e insolúvel e o teor de holocelulose. O teor de extrativo total foi determinado conforme a norma TAPPI 204 cm-97 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI T., 2007), substituindo o etanol/benzeno por etanol/tolueno. O material livre de extrativos foi utilizado para as demais análises químicas.

O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason modificado, de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). Já o teor de lignina solúvel foi aferido conforme o método proposto por Goldschimid (1971). A lignina total foi obtida a partir da soma da lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose foi obtido por diferença.

4.2.3 Poder calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico superior (PCS) da fibra de coco foi estimado a partir da correlação proposta por Yin (2011), representada pela Equação 1, utilizando os valores obtidos na análise imediata.

$$PCS = 0,1905 * MV + 0,2521 * CF \quad (1)$$

Em que: PCS é o poder calorífico superior estimado, em MJ/Kg; MV é o teor de materiais voláteis em %; e CF é o teor de carbono fixo, em %.

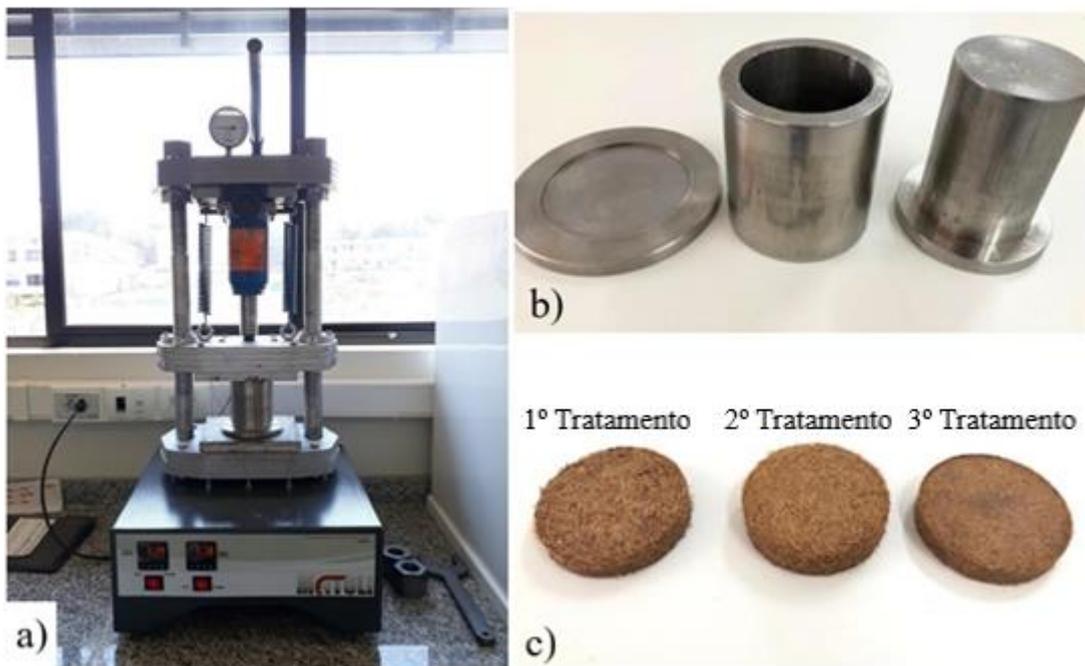
4.2.4 Densidade a Granel

A densidade a granel foi determinada para as três granulometrias obtidas para a produção dos briquetes, conforme a norma NBR 6922 (ABNT, 1981). A densidade a granel da fibra de coco moída foi determinada a partir da massa e volume que ocupou uma proveta graduada de 250 ml.

4.3 Briquetagem

A compactação dos briquetes foi realizada em uma prensa hidráulica com aquecimento, marca Matolli – 370M015. A temperatura empregada no processo de briquetagem foi de 120 °C e pressão de 15 MPa (considerada baixa pela literatura, contudo permitiu a avaliação da qualidade dos briquetes, uma vez que a variável de interesse foi o tamanho de partícula). Aproximadamente 40 ± 2 g de biomassa foi inserida em molde cilíndrico de aço inox com diâmetro de 7 cm e altura de 10 cm e, em seguida, submetida ao processo de compactação por 20 minutos. Após a compactação, os briquetes foram armazenados em sacos plásticos, à temperatura ambiente. A prensa hidráulica utilizada na produção, o molde cilíndrico de aço inox e os briquetes produzidos nas diferentes granulometrias estão demonstrados na Figura 5.

Figura 5 – Produção de Briquetes: a) Prensa hidráulica; b) Molde cilíndrico em aço inox; c) Briquetes produzidos.



Fonte: Do autor (2021)

4.4 Propriedades Físicas dos Briquetes

Para a estabilidade dimensional e densidade aparente dos briquetes foram avaliadas 10 amostras em cada granulometria. A densidade aparente foi realizada a partir do método estereométrico, que consiste em obter a massa dos briquetes em balança de laboratório com precisão de 0,001g e o volume a partir de medições do diâmetro e altura com o uso do paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. A estabilidade dimensional foi avaliada a partir da aferição da altura e diâmetro do briquete com auxílio do paquímetro digital logo após a compactação e após 24, 48 e 72 horas. Os briquetes foram acondicionados em sacos plásticos, à temperatura ambiente, após sua compactação e durante o período de 72 horas.

4.5 Propriedades Mecânicas

A resistência diametral dos briquetes foi realizada na máquina universal de ensaios EMIC DL 30000 N, apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Ensaio Mecânico: a) Máquina universal de ensaios EMIC DL 30000 N; b) Briquete do 3º tratamento sendo ensaiado



Fonte: Do autor (2021)

O ensaio é baseado na metodologia utilizada por Hansted et al. (2016) com modificação na quantidade de briquetes utilizados no ensaio. Foram avaliadas 5 amostras para cada tratamento, no qual cada uma foi inserida na plataforma de teste e pressionada a 3,5

mm/min até a sua ruptura. A força máxima foi registrada e a resistência a compressão foi determinada pela Equação 2:

$$\sigma_t = \frac{2*F}{\pi*D*L} \quad (2)$$

Em que: σ_t é a resistência à compressão, em kgf/cm²; F é a força máxima, em kgf; D é o diâmetro do briquete, em cm; e L é o comprimento, em cm.

4.6 Propriedades energéticas

A densidade energética consiste em quantificar o potencial que dado volume de material lignocelulósico tem de gerar energia. A densidade energética dos briquetes foi determinada pelo produto do poder calorífico superior da biomassa com a densidade aparente dos briquetes obtidos após 72 horas de compactação.

4.7 Análises Estatísticas

O delineamento experimental para avaliar a qualidade dos briquetes consistiu em três tratamentos, T1: partículas mistas; T2: 0,355 mm > partículas > 0,250 mm e T3: partículas < 0,250 mm, com 10 repetições para as propriedades físicas e 5 repetições para resistência mecânica a compressão, para cada tratamento. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e aqueles detectados como significativos pelo teste F, foram avaliados pelo teste de Tukey, a 5% de significância, utilizando o programa estatístico SISVAR – Sistema de Análise de Variância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da Biomassa

Os resultados das propriedades química imediata e química estrutural obtidos a partir da caracterização da fibra de coco estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas da fibra de coco

Propriedades	Fibra de Coco
Umidade (%)	11,15 _(0,119)
Teor de voláteis (%)	74,91 _(2,530)
Teor de Cinzas (%)	1,98 _(0,120)
Carbono Fixo (%)	23,11 _(2,488)
Extrativos (%)	12,08 _(0,828)
Lignina Total (%)	40,13 _(0,802)
Holocelulose (%)	47,79 _(0,804)
PCS estimado (MJ/kg)	20,10 _(1,3507)

Valor entre parênteses refere-se ao desvio padrão

Fonte: Do Autor (2021)

O teor de água encontrado para a fibra de coco foi de 11,15%, este resultado é considerado adequado para o processo de compactação. Quirino (1991) e Lucena *et al.* (2008), presumiram que a faixa ideal de umidade para a biomassa submetida ao processo de compactação deve estar entre 10 e 12%.

É importante determinar a umidade ótima para os diferentes tipos de biomassa, já que quantidades elevadas de água podem causar degradação do material por microorganismos, bem como a redução da durabilidade do briquete produzido (SETTER *et al.*, 2020). Além disso, a adequação da umidade é um fator importante na produção do briquete, já que o mesmo será utilizado como combustível sólido. Segundo Vasquez e Coronella (2009), a umidade possui papel fundamental tanto nas propriedades quanto no comportamento de qualquer material biológico. A alta porcentagem de água em materiais lignocelulósicos impede suas aplicações em processos como a combustão (SINGH, 2004) e, além disso, reduz o poder calorífico do material (SAENGER *et al.*, 2001; ZHANG; GHALY; LI, 2012).

Por outro lado, teores de água muito baixos diminuem a plasticidade das partículas aumentando o atrito durante a compactação (RYU et al., 2008), além de impedirem o aumento das forças de ligação entre as partículas, que é dado pelas forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio fornecidas pela presença de água (KALIYAN; MOREY, 2010; OKOT; BILSBORROW; PHAN, 2018).

O teor de materiais voláteis encontrado da fibra de coco foi de 74,91%. De maneira geral, a biomassa contém alta porcentagem de material volátil, variando de 48 a 86% (em peso em base seca) (KHAN et al., 2009; VASSILEV et al., 2010; ZHANG; XU; CHAMPAGNE, 2010). Segundo Vargas-Moreno et al. (2012), devido ao alto conteúdo de material volátil, a biomassa pode inflamar mesmo em temperaturas relativamente baixas. Todavia, a fração de materiais voláteis é rapidamente perdida e, dessa forma, para que a combustão seja concluída e os níveis de emissão sejam controlados, devem ser mantidas altas temperaturas (KHAN et al., 2009).

O teor de carbono fixo aferido para a fibra de coco foi de 23,11%. Padilla et al. (2016) encontraram um teor de carbono fixo para a fibra de coco de 22,28%. De acordo com Pirraglia et al. (2012), o valor calorífico possui uma dependência forte em relação ao teor de carbono fixo. Quantidades entre 15 e 25% de teor de carbono fixo na biomassa aumentam a eficiência energética do produto sólido, uma vez que promove a queima mais lenta do mesmo (EROL; HAYKIRI-ACMA; KÜÇÜKBAYRAK, 2010; HAYKIRI-ACMA; YAMAN; KUCUKBAYRAK, 2013; TODARO et al., 2015).

Em relação ao teor de cinzas, de acordo com Erol et al. (2010), a faixa encontrada para biomassa, geralmente, está entre 1,04 e 8,98%. A fibra de coco apresentou valores dentro dessa faixa relatada (1,98%). As cinzas são caracterizadas por restos inorgânicos que não sofrem o processo de combustão (VARGAS-MORENO et al., 2012) e, portanto, não são desejáveis para finalidades energéticas. Segundo Khan et al. (2009), altos teores de cinzas reduzem o poder calorífico do material. Além disso, em um período prolongado de utilização, um alto teor de cinzas pode causar problemas em equipamentos de queima como caldeira, uma vez que se depositam gerando incrustações (CACURO; WALDMAN, 2015). Hansted et al. (2016) na caracterização físico-química de *Leucaena Leucocephala* para produção de combustível sólido encontrou um valor de 2,15% para o teor de cinzas. Outros estudos encontraram um teor de cinzas de 7,71% para o pinhão manso (TOMELERI et al., 2017) e

3,71% para a fibra de coco (PADILLA et al., 2016). Portanto, o valor encontrado apresenta-se baixo, favorecendo a aplicação da fibra de coco como combustíveis sólidos.

A fibra de coco, apresentou elevado teor de lignina (40,13%). O teor de lignina do combustível lignocelulósico possui forte correlação com seu valor de aquecimento (KHAN et al., 2009) e, além disso, biomassas com alto teor de lignina são requeridas para uso energético (SETTER et al., 2020).

No processo de compactação da biomassa, a lignina possui a capacidade de se plastificar e atuar como aglutinante entre as partículas, devido ao aumento de pressão e temperatura do processo (KRIŽAN et al., 2015). Sendo assim, o alto teor de lignina encontrado na fibra de coco favorecerá o processo de compactação desse tipo de biomassa quando comparada a outras, como a *Leucaena Leucocephala* que apresentou um teor de 22,61% (HANSTED et al., 2016), e a palha de cana *in natura* com um teor de 24% (SILVA, 2009).

O poder calorífico superior é uma importante propriedade do combustível que define seu conteúdo de energia (CHANNIWALA; PARIKH, 2002). O poder calorífico da fibra de coco foi estimado a partir da correlação proposta por Yin (2011). O valor obtido foi de $20,10 \pm 0,01$ MJ/kg, valor próximo ao encontrado por Channiwala e Parikh (2002) para a casca de coco ($20,50 \pm 0,01$ MJ/kg). Esses mesmos autores também encontraram valores próximos aos da fibra de coco para outras biomassas, como o bagaço de cana ($18,73 \pm 0,01$ MJ/kg) e a palha de trigo ($17,99 \pm 0,01$ MJ/kg).

5.2 Propriedades físicas da fibra de coco a granel e dos briquetes

As propriedades físicas da fibra de coco e dos briquetes de fibra de coco estão apresentadas na Tabela 2.

A redução da granulometria da fibra de coco promoveu o aumento da densidade a granel, sendo que apenas o primeiro tratamento diferiu estatisticamente dos demais. Comparado ao primeiro tratamento, houve o aumento da densidade a granel de 14,72% e 19,02% para o segundo e terceiro tratamento, respectivamente. O aumento da densidade a granel com a redução da granulometria era esperado devido ao melhor encaixe e disposição das partículas menores entre si.

Tabela 2 – Características da fibra de coco e dos briquetes produzidos.

Tratamento	Densidade a granel (kg/m³)	Densidade Aparente dos briquetes (kg/m³)
1º Tratamento	163 a (2,69)	744 a (34,858)
2º Tratamento	187 b (2,05)	629 b (45,960)
3º Tratamento	194 b (3,96)	838 c (54,366)

Médias, na coluna, seguida da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey. *Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: Do autor (2021).

De acordo com Carone *et al.* (2011), a redução do tamanho das partículas possibilita que maior porcentagem de partículas menores, preencham, por rearranjo, os espaços vazios. Ainda segundo os mesmos autores, o aumento da área superficial, proporcionado pela redução do tamanho das partículas, facilita a absorção de calor, o que beneficia a ativação das propriedades de ligação dos componentes químicos da biomassa.

De acordo com Kaliyan e Morey (2009), quanto mais fina a moagem, maior será a durabilidade do briquete, uma vez que partículas mais finas interagem melhor com a umidade, gerando maior grau de condicionamento. Sette Jr. et al. (2018), em seus estudos com a casca da madeira de *E. urograndis* também avaliaram o efeito positivo da redução da granulometria no aumento da densidade aparente e resistência mecânica dos briquetes produzidos. Semelhantemente, Quirino et al. (2012), ao produzir briquetes com partículas finas e grossas de eucalipto, também visualizou maiores valores de densidade aparente e resistência mecânica para os briquetes produzidos com partículas menores.

Percebe-se o aumento percentual de densidade aparente de 12,63% nos briquetes do 3º tratamento em relação ao 1º tratamento. Todavia, a densidade aparente dos briquetes do 2º tratamento foi, aproximadamente, 15,46% menor quando comparada ao 1º tratamento. Comparando-se a densidade aparente dos briquetes com a densidade a granel houve a redução de volume de cerca de 4 vezes, o que significa que uma dada quantidade de fibra de coco densificada ocupa um espaço 4 vezes menor que a mesma quantidade a granel.

Uma explicação plausível para o fato do 1º tratamento ter apresentado uma densidade aparente maior que o 2º tratamento é a granulometria mista do mesmo. Geralmente, partículas de menor granulometria são requeridas para a produção de briquetes de maior densidade

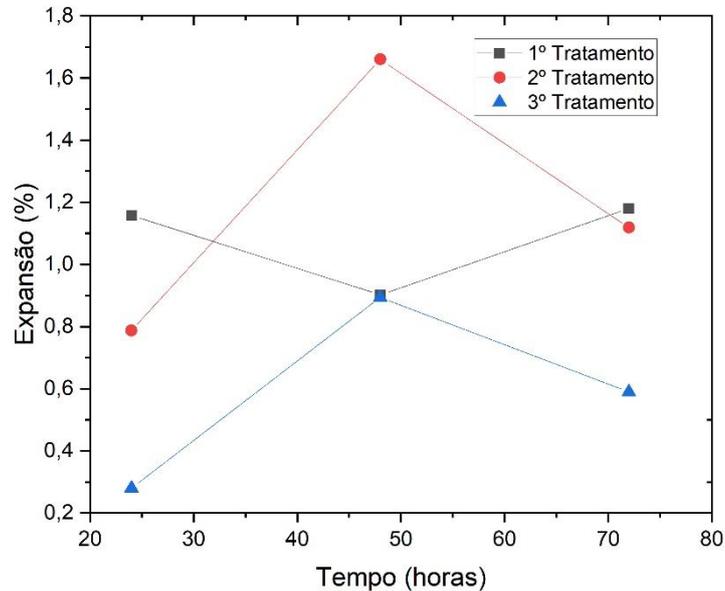
aparente, todavia, a mistura de partículas de diferentes tamanhos também apresenta um comportamento influente nesse quesito, uma vez que, nesse caso, as partículas intermediárias e menores se encaixam nos espaços vazios deixados entre as partículas maiores durante o processo de briquetagem. Segundo Brand et al. (2017), a mistura de partículas de diferentes granulometrias influenciam na produção de briquetes com melhor resistência mecânica, uma vez que há o melhor acondicionamento das partículas. Esse mesmo autor encontrou densidades aparentes maiores para briquetes de palha de arroz produzidos com partículas de granulometria mais heterôgenea, concluindo que a presença de vários tamanhos de partícula promove aumento de massa por unidade de volume, resultando em maior densidade aparente do briquete compactado.

Entretanto, o comportamento do 3º tratamento em relação ao primeiro mostrou a influência de partículas menores sobre a densidade dos briquetes, confirmando o que foi relatado por Ndindeng *et al.* (2015) em relação a partículas menores promoverem briquetes com maior densidade.

Os briquetes geralmente devem apresentar uma densidade em torno de 600 a 800 kg/m³ (HOLLEY, 1983; MANI; TABIL; SOKHANSANJ, 2003; MCMULLEN et al., 2005; OBERNBERGER; THEK, 2004). No presente trabalho, os briquetes apresentaram valores em torno dessa faixa, com exceção dos briquetes do 3º tratamento, cuja densidade aparente estava acima dessa faixa. Essa faixa de valores é a faixa ótima no que diz respeito à redução de custos de transporte, facilidade de manuseio e armazenamento (KALIYAN; MOREY, 2009).

A expansão volumétrica dos briquetes pode ser observada na Figura 7. Nota-se que os briquetes do 2º e 3º tratamento apresentaram comportamento semelhante, enquanto que o briquete do 1º tratamento obteve comportamento mais oscilatório. Foi possível observar que os briquetes do 2º e 3º tratamento expandiram com o tempo, havendo uma expansão máxima em 48 horas após a briquetagem e uma redução do volume em 72 horas. Os briquetes do 1º tratamento obtiveram uma redução de volume em 48 horas seguida da estabilização no valor inicial de volume em 72 horas.

Figura 7 – Expansão Volumétrica dos briquetes após a compactação.



Fonte: Do autor (2021)

Os valores de expansão volumétrica encontrados no presente trabalho para a fibra de coco são baixos quando comparados aos valores encontrados para outras biomassas em outros trabalhos, o que indica uma boa estabilidade dimensional. Geralmente, briquetes com maior estabilidade dimensional apresentam maior resistência mecânica (SILVA et al., 2015). Yamaji *et al.* (2013) encontrou valores para expansão longitudinal de 18% para briquetes de bagaço de cana e 35% para briquetes de capim. Os valores encontrados por Silva *et al.* (2015) variaram de 3,85 a 9%, levando o mesmo a considerar que os resultados dos ensaios de expansão longitudinal são influenciados pelo tipo de biomassa utilizada. Além disso, partículas menores produzem materiais mais densos e que, por consequência, são menos higroscópicos (SILVA et al., 2015). No presente estudo foi observado esse comportamento, uma vez que os briquetes do 3º tratamento, produzidos com partículas de menor tamanho e que apresentaram a maior densidade aparente, apresentaram a menor expansão volumétrica.

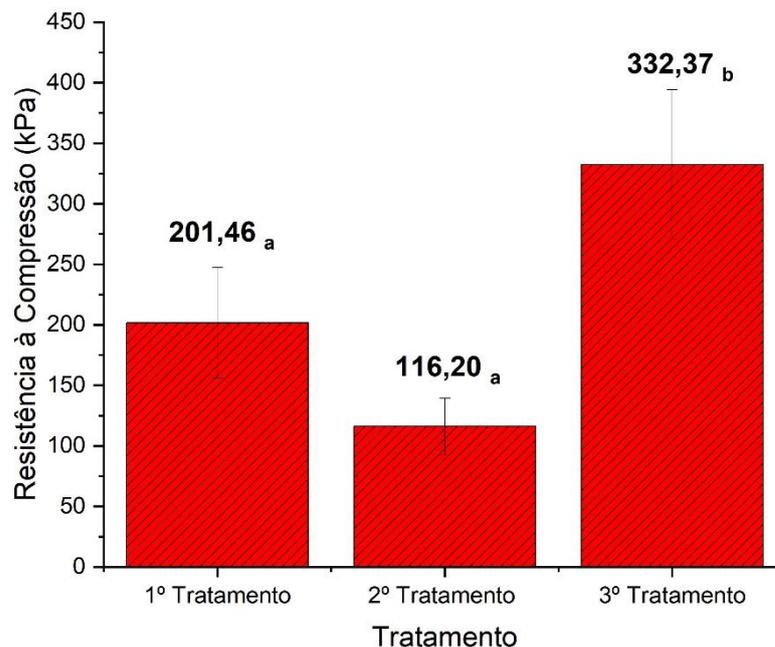
A expansão volumétrica dos briquetes é dada pela absorção de umidade do ambiente (MORENO; FONT; CONESA, 2016), ou seja, é influenciada pela higroscopicidade da biomassa com a qual o briquete é produzido. Nesse contexto, Silva et al. (2015) relataram que a umidade inicial e a composição química do material lignocelulósico se relacionam à expansão volumétrica. Isso, porque a celulose e hemicelulose, componentes da parede celular, apresentam sítios químicos, nos quais a água se liga a partir de ligações de hidrogênio (SETTER et al., 2020). Todavia, a lignina não possui esse mesmo comportamento em relação à absorção

de água (ACHARJEE; CORONELLA; VASQUEZ, 2011). Sendo assim, a estabilidade dimensional dos briquetes de fibra de coco pode ser explicada pelo alto teor de lignina desse material (40,13%) associado ao uso de temperatura durante o processo de compactação, que facilitou as ligações químicas entre as partículas do briquete devido ao amolecimento da lignina pela temperatura e sua ação como aglutinante, favorecendo que os briquetes fossem mais estáveis. Setter et al. (2020) também observaram que os briquetes produzidos com casca de café, cujo teor de lignina era de 27,14%, também apresentaram-se mais estáveis e com menores valores de expansão longitudinal quando comparados à outros.

5.3 Propriedades mecânicas

A resistência à compressão diametral dos briquetes confeccionados com fibra de coco foi determinada e os valores são mostrados na Figura 8.

Figura 8 – Resistência mecânica dos briquetes de fibra de coco.



Fonte: Do autor (2021)

Os resultados obtidos para o 1º e 2º tratamento apresentaram-se iguais estatisticamente, enquanto que o 3º tratamento foi estatisticamente diferente dos demais. Os valores demonstram, claramente, que o tamanho de partícula foi uma variável de direta influência na resistência à compressão dos briquetes, uma vez que o 3º tratamento apresentou maior resistência à compressão. Isso pode ser explicado devido ao melhor acoplamento e ligação entre as partículas, uma vez que são menores e apresentam maior superfície de contato,

gerando ligações mais fortes entre si. A densidade aparente também foi um fator de influência, uma vez que o terceiro tratamento por ser mais denso e compacto, apresentou maiores valores de resistência mecânica.

A capacidade das partículas de formar briquetes com considerável resistência mecânica relaciona-se ao tipo de mecanismo de ligação ou intertravamento, sendo assim é possível caracterizar a qualidade da briquete, que depende tanto da resistência mecânica quanto da durabilidade do mesmo (TUMULURU et al., 2011)

O valor de resistência mecânica obtido por Padilla et al. (2016) para briquetes produzidos com 100% de fibra de coco foi de 370 kPa. Kalyan e Morey (2010) ao avaliarem os mecanismos de ligação de briquetes produzidos a partir de palha de milho e capim, concluíram que as formas de ligação entre as partículas se davam predominantemente devido à formação de pontes sólidas pelos ligantes naturais presentes na biomassa, assim como a lignina, que sofre a transição vítrea durante o processo de compactação com temperatura, sendo ativada e funcionando como aglutinante que posteriormente endurece melhorando a adesão das partículas. Altas temperaturas promovem o fluxo de polímeros amorfos, como a lignina, de uma partícula de biomassa para outras adjacentes, resultando assim, em mecanismos de ligação através de pontes sólidas (CHRISOSTOMO; YAMAJI; YAMAMOTO, 2014).

Chrisostomo, Yamaji e Yamamoto (2014) concluíram a partir de seus estudos sobre a densificação da serragem de *Eucalyptus sp.* em diferentes temperaturas, que os briquetes compactados sem aquecimento apresentaram espaços vazios entre as partículas, caracterizando uma baixa adesão entre partículas adjacentes. Os mecanismos de ligação desenvolvidos nesse caso foram forças de Van Der Waals e ligações de hidrogênio. Já no caso dos briquetes produzidos com aquecimento, as partículas não apresentaram espaços vazios entre si e a partir da microscopia eletrônica de varredura, foi possível visualizar a formação de pontes sólidas possivelmente dada pelo amolecimento da lignina. Sendo assim, infere-se que a maior resistência mecânica obtida para o 3º tratamento relaciona-se, de acordo com Kirsten et al. (2016), com o fato de partículas menores ocasionarem em melhor fluxo dos ligantes naturais, promovendo assim, uma porcentagem maior de ligações entre partículas adjacentes e como consequência, melhor resistência mecânica dos briquetes.

De acordo com Silva et al. (2015), maior estabilidade dimensional resulta em briquetes com maior resistência mecânica. Ao se observar os valores de expansão volumétrica (Figura 4), o terceiro tratamento se sobressaiu apresentando valores mais baixos que os outros,

caracterizando maior estabilidade dimensional que, conseqüentemente, resultou em maior resistência mecânica.

De acordo com Kaliyan e Morey (2009), o teste de resistência à compressão muitas vezes não indica a verdadeira compressão dos produtos densificados. Li e Liu (2000) observaram a redução de 1/3 do tamanho dos briquetes de serragem até que os mesmos sofressem a quebra. No presente trabalho, verificou-se o mesmo: o briquete de fibra de coco, ao ser comprimido na máquina de ensaios não rachava, apenas esmagava, o que pode ser devido às fibras de coco. Portanto, os resultados não apresentaram repetibilidade, como esperado.

A variação percentual da resistência mecânica dos briquetes do 3º tratamento (332,37 kPa) em relação aos briquetes do 1º (201,46 kPa) e do 2º (116,19 kPa) foi de 64,98% e 186,06%, respectivamente. A presença de espaços vazios em briquetes confeccionados com partículas de maior granulometria também pode explicar o fato dos mesmos apresentarem menor resistência mecânica, uma vez que os espaços vazios permitem que haja deslocamento de uma parte do corpo do briquete sobre outra (KALIYAN; MOREY, 2006). Sendo assim, também é possível avaliar que os briquetes do 2º tratamento apresentaram menor resistência mecânica uma vez que possuem partículas semelhantes entre si, havendo a possibilidade de existirem espaços vazios entre as mesmas. Já os briquetes do 1º tratamento, por apresentarem partículas mistas que proporcionam melhor acondicionamento, apresentaram resistência mecânica maior que o 2º tratamento, quando comparado ao 3º tratamento.

5.4 Densidade energética da fibra de coco e dos briquetes

A densidade energética dos briquetes de fibra de coco variou de 12,90 a 17,180 GJ/m³. Souza e Vale (2016) encontraram uma faixa de valores para densidade energética entre 14,31 e 19,29 GJ/m³ para briquetes produzidos a partir de biomassas como *Pinus*, *Tauari*, *Cumarú*, Casca de arroz e Bagaço de Cana. A Tabela 3 apresenta os valores de densidade energética para a fibra de coco a granel e para os briquetes.

Os resultados mostraram que a compactação da fibra de coco, por meio da briquetagem, aumentou a densidade energética de 3,28 GJ/m³ para 15,25 GJ/m³ para o primeiro tratamento; 3,76 GJ/m³ para 12,90 GJ/m³ para o segundo tratamento e 3,90 GJ/m³ para 17,18 GJ/m³ para o terceiro tratamento, ou seja, a compactação da fibra de coco promoveu o aumento percentual da densidade energética em relação à biomassa não densificada em 364,93% (1º Tratamento), 243,08% (2º Tratamento) e 340,51% (3º Tratamento). Esses resultados provam a

eficiência da briquetagem na concentração de energia por volume de biomassa, promovendo redução de custos de transporte e armazenamento, além de contribuir para o processo de combustão.

Tabela 3 - Densidade energética da biomassa a granel e dos briquetes de fibra de coco

Tratamento	Fibra de Coco (GJ/m³)	Briquetes (GJ/m³)
1º Tratamento	3,28 a (0,054)	15,25 a (0,700)
2º Tratamento	3,76 b (0,041)	12,90 b (0,930)
3º Tratamento	3,90 b (0,080)	17,18 c (1,150)

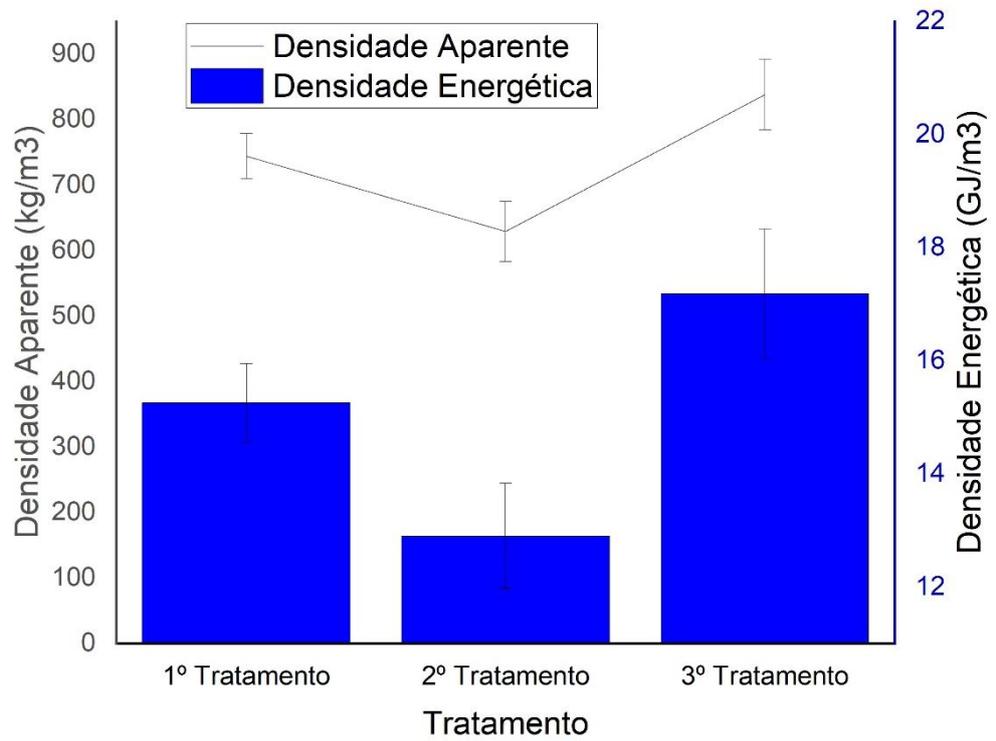
Médias, na coluna, seguida da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey. *Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: Do autor (2021)

A diferença encontrada nos valores obtidos para densidade energética possui relação direta com o tamanho de partículas utilizado para a produção dos briquetes dos três tratamentos. A redução do tamanho de partículas permite a acomodação de maior quantidade de material em um mesmo volume. O mesmo ocorre com as partículas mistas do 1º tratamento, cujos briquetes apresentaram maiores valores de densidade energética quando comparados aos briquetes do 2º tratamento. Devido ao fato do tratamento com partículas mistas possuir diferentes tamanhos de partículas, os espaços vazios formados entre partículas maiores são preenchidos por partículas menores, e, dessa forma, podem apresentar melhores propriedades finais nos briquetes.

A Figura 9 demonstra o comportamento da densidade energética dos briquetes em relação às suas densidades aparentes. Os resultados demonstrados no gráfico (Figura 9) apresentaram uma relação proporcional entre a densidade aparente e a densidade energética. Os valores encontrados diferiram estatisticamente (Tabela 3). De acordo com Sette Jr. et al. (2018), produtos mais densos possuem maior energia concentrada por unidade de volume, sendo este um fator de destaque para as vantagens econômicas obtidas a partir do processo de densificação da biomassa.

Figura 9 - Aumento da densidade energética em relação à densidade aparente



Fonte: Do autor (2021)

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que os parâmetros de produção (temperatura, pressão e tempo de compactação) utilizados no processo de compactação da fibra de coco foram adequados e permitiram que as propriedades requeridas fossem avaliadas com eficiência. A produção de briquetes com diferentes granulometrias influenciou no comportamento dos briquetes em termos de densidade aparente, expansão longitudinal, resistência mecânica e densidade energética. De modo geral, os briquetes produzidos com menor tamanho de partícula (partícula $< 0,250$ mm) apresentaram melhores propriedades físicas, mecânicas e energéticas. A redução do tamanho de partículas para granulometria menor que 0,250 mm contribuiu para a redução dos espaços vazios e para a formação de ligações mais fortes, resultando em briquetes com melhores propriedades mecânicas. Além disso, a redução do tamanho das partículas para granulometria menor que 0,250 mm também proporcionou melhor acondicionamento das mesmas, permitindo maior concentração de quantidade de energia por unidade de volume.

A presença de diferentes tamanhos de partículas (1º tratamento) contribuiu para o preenchimento de espaços vazios entre as partículas e, conseqüentemente, proporcionou briquetes com melhores propriedades físicas (densidade aparente e expansão volumétrica), mecânicas e energéticas em relação aos briquetes do 2º tratamento.

O processo de compactação da fibra de coco comprovou que é possível reduzir em até 4 vezes o volume ocupado pela fibra de coco a granel, demonstrando as vantagens em relação ao custo-benefício nas operações de transporte e armazenamento devido à economia de espaço.

A expansão volumétrica dos briquetes também foi influenciada pelos diferentes tamanhos de partículas, cujos os tratamentos de partículas mistas (1º tratamento) e partículas menores que 0,250 mm (3º tratamento) expandiram menos ao longo das 72 horas de observação.

No que diz respeito a resistência mecânica a compressão diametral, os briquetes do 3º tratamento (partículas $< 0,250$ mm) acarretaram em melhores valores. De modo geral, o fato de as partículas menores proporcionarem melhor acomodamento e ligações mais fortes entre si, favoreceu para que o 3º tratamento apresentasse melhores propriedades físico-mecânicas. Em termos de propriedades energéticas, o 3º tratamento também apresentou melhores resultados, uma vez que a compactação das partículas menores proporcionou um aumento percentual de 340,51% para a densidade energética dos briquetes em relação à fibra de coco a granel. Portanto, em termos de qualidades físico-mecânicas e energéticas pode-se inferir que os

briquetes produzidos com as partículas menores que 0,250 mm foram melhores e, além disso, por serem mais densos e compactos, acomodariam maior quantidade de energia por unidade de volume, além de, não absorverem em excesso a umidade do ambiente, fator tal que poderia causar dano à durabilidade do produto.

Todavia, observando-se em termos de aplicação industrial, os briquetes do 1º tratamento seriam os mais adequados, já que possuem uma densidade aparente dentro da faixa ótima destinada para redução dos custos de transporte, facilidade de manuseio e armazenamento (600 a 800 kg/m³). Além disso, os gastos de tempo e dinheiro com o peneiramento e moagem das fibras de coco para a obtenção das partículas destinadas para o 3º tratamento inviabilizam o seu uso quando comparado à fácil obtenção das partículas mistas do 1º tratamento.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR NM. **Agregados: determinação da composição granulométrica**. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6922 Carvão vegetal – determinação da massa específica (densidade a granel)**. Out/1981.
- ACHARJEE, T. C.; CORONELLA, C. J.; VASQUEZ, V. R. **Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass**. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 7, p. 4849–4854, abr. 2011.
- ANEEL, A. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, 2008.
- ASTM. D1762-84, **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**, ASTM, 2013.
- BACK, E. L. **The bonding mechanism in hardboard manufacture review report**. *Holzforschung*, v. 41, n. 4, p. 247–258, 1987.
- BALAT, M. et al. **Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals**. Part 1: Pyrolysis systems. *Energy conversion and Management*, v. 50, n. 12, p. 3147–3157, 2009.
- BERGSTRÖM, D. et al. **Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets**. *Fuel Processing Technology*, v. 89, n. 12, p. 1324–1329, dez. 2008.
- BRAINER, M. S. C. P; XIMENES, L. F. **Produção de coco – soerguimento das áreas tradicionais do Nordeste**. *Caderno Setorial Etene, Fortaleza*, v. 127, n. 5, p. 1-15, ago. 2020. Mensal.
- BRAND, M. A. et al. **Production of briquettes as a tool to optimize the use os waste from rice cultivation and industrial processing**. *Renewable Energy*, v. 111, p. 116-123, out. 2017.
- CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. **Cinzas da queima de biomassa: aplicações e potencialidades**. *Revista virtual de Química*, v. 7, n. 6, p. 2154–2165, 2015.
- CARDOSO, C. R. **Efeito da temperatura e da adição de sais inorgânicos na pirólise analítica de resíduo de tabaco**. Diss. Tese (Doutorado em Engenharia Química, área de Desenvolvimento de Processos Químicos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade de Uberlândia, MG, 2012.
- CARONE, M. T.; PANTALEO, A.; PELLERANO, A. **Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L.** *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 1, p. 402–410, 1 jan. 2011.
- CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S. DE; MAKISHIMA, N. **Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola**. *Horticultura Brasileira*, v. 20, n. 4, p. 533–535, dez. 2002.

- CASTELLANO, J. M. et al. **Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses.** Fuel, v. 139, p. 629–636, jan. 2015.
- CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P. **A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels.** Fuel, v. 81, n. 8, p. 1051–1063, 1 maio 2002.
- CHEN, L. J.; XING, L.; HANA, L. **Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology.** Renewable & Sustainable Energy Reviews, Oxford, U.K., v. 13, n. 9, p. 2689-2695, Dec. 2009
- CHOU, C.-S.; LIN, S.-H.; LU, W.-C. **Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran.** Fuel processing technology, v. 90, n. 7–8, p. 980–987, 2009.
- CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F.; YAMAMOTO, H. **Densificação da Serragem de Eucalyptus SP em Diferentes Temperaturas.** In: ANAIS DO 9º CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, SÃO PAULO, BRASIL. 2014.
- CORRADINI, E. et al. **Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde.** Embrapa Agroindústria Tropical-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2009.
- DEMIRBAS, A. **The importance of bioethanol and biodiesel from biomass.** Energy Sources, Part B, v. 3, n. 2, p. 177–185, 2008a.
- DEMIRBAS, A. **Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review.** Journal of Hazardous Materials, v. 157, n. 2, p. 220–229, 15 set. 2008b.
- DEMIRBAS, A.; SAHIN, A. **Evaluation of biomass residue 1. Briquetting waste paper and wheat straw mixtures.** A. S, p. 9, 1998.
- D. PADILLA, E. R. et al. **Production and Physical-Mechanical Characterization of Briquettes from Coconut Fiber and Sugarcane Straw.** Revista Virtual de Química, v. 8, n. 5, p. 1334–1346, 2016.
- EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KÜÇÜKBAYRAK, S. **Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data.** Renewable Energy, v. 35, n. 1, p. 170–173, 1 jan. 2010.
- ESTEVES, M. R. L.; ABUD, A. K.; BARCELLOS, K. M. **Avaliação do potencial energético das cascas de coco verde para aproveitamento na produção de briquetes.** Scientia plena, v. 11, n. 3, 2015.
- FABORODE, M.; O'CALLAGHAN, J. **Optimizing the compression/briquetting of fibrous agricultural materials.** Journal of Agricultural Engineering Research, v. 38, n. 4, p. 245–262, 1987.

FERREIRA, A. et al. **Caracterização energética da fibra da casca do coco com posterior produção de briquete.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, XXI. 2016a

FREITAS, A. J. et al. **Efeito da Pressão e do Tempo de Compactação nas Propriedades de Briquetes de Resíduos Madeireiros de Paricá.** *Nativa*, v. 4, n. 6, p. 380–385, 31 dez. 2016.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados.** São PauloSP, v. 21, n. 59, p. 7 - 20, 2007.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions.** New York: John Wiley Interprice, 1971.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. **Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método klason modificado.** *O Papel*. v. 47, n. 8, p. 36–38, 1986.

GONÇALEZ, J. C. **APROVEITAMENTO DA CASCA DO COCO-VERDE (Cocos nucifera L.) PARA PRODUÇÃO DE POLPA CELULÓSICA.** *Ciência Florestal*, v. 26, n. 1, p. 321–330, 31 mar. 2016.

GROVER, P.; MISHRA, S. **Biomass briquetting: technology and practices.** [s.l.] Food and Agriculture Organization of the United Nations Bangkok, Thailand, 1996. v. 46

HANSTED, A. L. S. et al. **Caracterização físico-química da biomassa de Leucaena leucocephala para produção de combustível sólido.** *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 5, 2016.

HASHEM, A. et al. **Adsorbent based on agricultural wastes for heavy metal and dye removal: A review.** *Energy Educ. Sci. Technol*, v. 19, n. 69, p. e86, 2007.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S.; KUCUKBAYRAK, S. **Production of biobriquettes from carbonized brown seaweed.** *Fuel Processing Technology*, v. 106, p. 33–40, 1 fev. 2013.

HOLLEY, C. **The densification of biomass by roll briquetting.** In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE FOR BRIQUETTING AND AGGLOMERATION (IBA). 1983

IRVINE, G. **The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis.** *Tappi Journal*, v. 67, n. 5, p. 118–121, 1984.

ISHIZAKI, M. H. et al. **Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 16, n. 3, p. 182–186, 2006.

KALIYAN, N. **Densification of Biomass.** Ph.D. dissertation. Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, Twin Cities, MN, 2008.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. **Factors affecting strength and durability of densified products.** In: 2006 ASAE ANNUAL MEETING. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.

- KALIYAN, N.; MOREY, R. V. **Factors affecting strength and durability of densified biomass products.** *Biomass and bioenergy*, v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009.
- KALIYAN, N.; MOREY, R. V. **Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass.** *Bioresource Technology*, v. 101, n. 3, p. 1082-1090, fev. 2010
- KERS, J. et al. **Determinantion of physical, mechanical and burning characteristics of polymeric waste material briquettes.** *Estonian Journal of Engineering*, v. 16, p. 307–316, 2010.
- KHAN, A. et al. **Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies.** *Fuel processing technology*, v. 90, n. 1, p. 21–50, 2009.
- KIRSTEN, C. et al. **Hay pellets—The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production.** *Fuel processing technology*, v. 148, p. 163–174, 2016.
- KÖSER, H. J.; SCHMALSTIEG, G.; SIEMERS, W. **Densification of water hyacinth—basic data.** *Fuel*, v. 61, n. 9, p. 791–798, 1982.
- KRIŽAN, P. et al. **Behavior of beech sawdust during densification into a solid biofuel.** *Energies*, v. 8, n. 7, p. 6382–6398, 2015.
- LAL, R. **World crop residues production and implications of its use as a biofuel.** *Environment International*, v. 31, n. 4, p. 575–584, 1 maio 2005.
- LI, Y.; LIU, H. **High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel.** *Biomass and Bioenergy*, v. 19, n. 3, p. 177–186, 2000.
- LIU, Z.; QUEK, A.; BALASUBRAMANIAN, R. **Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars.** *Applied Energy*, v. 113, p. 1315–1322, jan. 2014.
- LUCENA, D. A.; MEDEIROS, R. D. de; FONSECA, U. T.; ASSIS, P. S. **Aglomeración de moinha de carvão em alto-forno e geração de energia.** *Tecnologia em Metalúrgica e Materiais, São Paulo*, v. 4, n. 4, p.1 - 6, 2008.
- LÚCIA DE MORAES, S. et al. **Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada.** *REVISTA IPT TECNOLOGIA E INOVAÇÃO*, v. 1, n. 4, 2017.
- MACBAIN, R.; REYNOLDS, B. **Pelleting animal feed: formulation, conditioning, operating techniques, pelleting urea formulations.** [s.l.] Feed Production Council, American Feed Manufacturers, 1967
- MANI, S.; TABIL, L.; SOKHANSANJ, S. **An overview of compaction of biomass grinds.** *Powder Handling and processing*, v. 15, n. 3, p. 160–168, 2003.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. **Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses.** *Biomass and bioenergy*, v. 30, n. 7, p. 648–654, 2006.

MCMULLEN, J. et al. **Storage and handling characteristics of pellets from poultry litter.** *Applied Engineering in Agriculture*, v. 21, n. 4, p. 645–651, 2005.

MITCHUAL, S. J.; FRIMPONG-MENSAH, K.; DARKWA, N. A. **Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes.** *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, v. 4, n. 1, p. 30, 14 ago. 2013.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. **Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review.** *Energy & Fuels*, v. 20, n. 3, p. 848–889, maio 2006.

MORENO, A. I.; FONT, R.; CONESA, J. A. **Physical and chemical evaluation of furniture waste briquettes.** *Waste Management*, v. 49, p. 245–252, mar. 2016.

MUAZU, R. I.; STEGEMANN, J. A. **Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs.** *Fuel Processing Technology*, v. 133, p. 137–145, maio 2015.

NDINDENG, S. A. et al. **Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products.** *Energy for Sustainable Development*, v. 29, p. 24–31, dez. 2015.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** 1ª ed. – Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2006. P. 98-100.

NUREK, T. et al. **The effect of temperature and moisture on the chosen parameters of briquettes made of shredded logging residues.** *Biomass and Bioenergy*, v. 130, p. 105368, 1 nov. 2019.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour.** *Biomass and Bioenergy, Pellets 2002. The first world conference on pellets.* v. 27, n. 6, p. 653–669, 1 dez. 2004.

OKOT, D. K.; BILSBORROW, P. E.; PHAN, A. N. **Effects of operating parameters on maize COB briquette quality.** *Biomass and bioenergy*, v. 112, p. 61–72, 2018.

D. PADILLA, E. R. et al. **Production and Physical-Mechanical Characterization of Briquettes from Coconut Fiber and Sugarcane Straw.** *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 5, p. 1334–1346, 2016.

PANDA, B.; DIGDARSINI, T.; MALLICK, S. **Physicomechanical and physicochemical characterizations of biexponential compaction process of paracetamol in the presence of talcum-lubricated-MCC.** *Powder Technology*, v. 273, p. 91–101, 2015.

PARIKKA, M. **Global biomass fuel resources.** *Biomass and bioenergy*, v. 27, n. 6, p. 613–620, 2004.

- PAULA, L. E. DE R. E et al. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 66, p. 103–103, 17 jun. 2011.
- PHILIPP, P.; D' ALMEIDA, M. L. O.; **Celulose e papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**, 2ª ed., IPT: São Paulo, 1988.
- PICKARD, G.; ROLL, W. M.; RAMSER, J. **Fundamentals of hay wafering**. 1961
- PIRRAGLIA, A. et al. **FUEL PROPERTIES AND SUITABILITY OF EUCALYPTUS BENTHAMII AND EUCALYPTUS MACARTHURII FOR TORREFIED WOOD AND PELLETS**. BioResources, v. 7, n. 1, p. 0217–0235, 2012.
- PROTÁSIO, T. DE P. et al. **Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 68, p. 273, 17 jun. 2011.
- QUIRINO, W. F. et al. **Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira**. Scientia Forestalis, v. 40, n. 96, p. 525–536, 2012.
- QUIRINO, W. F.; BRITO, J. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos**. Brasília, DF: LPF/IBAMA, 1991.
- RABIER, F. et al. **Participle density determination of pellets and briquettes**. Biomass and Bioenergy, Philadelphia, v. 30, p. 954-963, 2006.
- ROSA, M.F. et al. **Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola**. Comunicado Técnico, 54. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, p. 6. 2001.
- RYU, C. et al. **Pelletised fuel production from coal tailings and spent mushroom compost — Part I: Identification of pelletisation parameters**. Fuel Processing Technology, v. 89, n. 3, p. 269–275, 1 mar. 2008.
- SAENGER, M. et al. **Combustion of coffee husks**. Renewable Energy, v. 23, n. 1, p. 103–121, maio 2001.
- SAMUELSSON, R. et al. **Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets**. Applied Energy, v. 99, p. 109–115, nov. 2012.
- SANTOS, G. H. F. et al. **Biomassa como energia renovável no Brasil**. Revista Uningá Review. Maringá, Vol. 29, n.2, pp.03-13, Jan – Mar. 2017
- SETTE JR., C. R. et al. **Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production**. Industrial Crops and Products, v. 122, p. 209–213, 15 out. 2018.
- SETTER, C. **BIOMASSA RESIDUAL CAFEIEIRA COMO ALTERNATIVA PARA PRODUÇÃO DE BIOCMBUSTÍVEIS**. p. 125, 2019.
- SETTER, C. et al. **Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks**. Environmental Science and Pollution Research, 14 out. 2020.

SHEEHAN, J. et al. **An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles.** [s.l.] National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 1998.

SILVA, C. A. da; ROCHA, J. D. **Estudo técnico econômico da compactação de resíduos.** 2007. 156p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2007

SILVA, D. A. et al. **CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSAS PARA A BRIQUETAGEM. FLORESTA**, v. 45, n. 4, p. 713–722, 9 set. 2015.

SILVA, V. F. N. DA. **Estudos de pré-tratamento e sacarificação enzimática de resíduos agroindustriais como etapas no processo de obtenção de etanol celulósico.** 2009.

SINGH, R. N. **Equilibrium moisture content of biomass briquettes.** Biomass and Bioenergy, v. 26, n. 3, p. 251–253, 1 mar. 2004.

SIQUEIRA, L. A.; ARAGÃO, W.M.; TUPINAMBÁ, E.A., **A introdução do coqueiro no Brasil, importância histórica e agrônômica.** Aracaju. EMPRAPA Tabuleiros Costeiros. 24 (Embrapa Tabuleiros Costeiros, Documento 47), 2002.

SOLTES, E.; ELDER, T. **Pyrolysis in organic chemicals from biomass.** IS Goldstein. Florida, CRC Press, 1981.

SOUZA, F. DE; VALE, A. T. DO. **Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 36, n. 88, p. 405–413, 30 dez. 2016.

SUHARTINI, S.; HIDAYAT, N.; WIJAYA, S. **Physical properties characterization of fuel briquette made from spent bleaching earth.** biomass and bioenergy, v. 35, n. 10, p. 4209–4214, 2011.

TAKAHASHI, H. **Aproveitamento de fibra de coco verde com amido de mandioca visando aplicações em sistemas de embalagem.** XVII Congresso Interno de Iniciação Científica da Unicamp, 1. Technical Association of Pulp and Paper Industry, Test methods. Atlanta: Tappi Press (1998). 2009.

TAPPI T. 204 cm-97. **Solvent extractives of wood and pulp.** p. 12, 2007.

TODARO, L. et al. **Thermal treatment modifies the calorific value and ash content in some wood species.** Fuel, v. 140, p. 1–3, 2015.

TOMELERI, J. O. P. et al. **Caracterização química e energética de epicarpo residual do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) e briquete produzido.** Revista Virtual de Química, v. 9, n. 3, p. 942–952, 2017.

TUMULURU, J. S. et al. **A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application.** Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 5, n. 6, p. 683–707, 2011.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T. **A review on biomass densification technologie for energy application.** [s.l.] Idaho National Laboratory (INL), 2010.

VARGAS-MORENO, J. M. et al. **A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 5, p. 3065–3083, 1 jun. 2012.

VASQUEZ, V.; CORONELLA, C. **A simple model for vapor-moisture equilibrium in biomass substrates.** AIChE journal, v. 55, n. 6, p. 1595–1603, 2009.

VASSILEV, S. V. et al. **An overview of the chemical composition of biomass.** Fuel, v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010.

WANG, Y.; WU, K.; SUN, Y. **Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw.** Journal of the Energy Institute, v. 91, n. 1, p. 153–162, fev. 2018.

YAMAJI, F. M. et al. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE BRIQUETES. ENERGIA NA AGRICULTURA,** v. 28, n. 1, p. 11, 5 abr. 2013.

YAMAN, S. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks.** Energy Conversion and Management, v. 45, n. 5, p. 651–671, mar. 2004.

YANK, A.; NGADI, M.; KOK, R. **Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications.** Biomass and Bioenergy, v. 84, p. 22–30, 1 jan. 2016.

YIN, C.-Y. **Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses.** Fuel, v. 90, n. 3, p. 1128–1132, 2011.

ZHANG, L.; XU, C. C.; CHAMPAGNE, P. **Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass.** Energy conversion and management, v. 51, n. 5, p. 969–982, 2010.

ZHANG, Y.; GHALY, A. E.; LI, B. **AVAILABILITY AND PHYSICAL PROPERTIES OF RESIDUES FROM MAJOR AGRICULTURAL CROPS FOR ENERGY CONVERSION THROUGH THERMOCHEMICAL PROCESSES.** American Journal of Agricultural and Biological Sciences, v. 7, n. 3, p. 312–321, 1 mar. 2012.