



**MARIA ROSA RIBEIRO DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS  
DE BRIQUETES PRODUZIDOS COM BAGAÇO DE MALTE**

**LAVRAS – MG**

**2023**

**MARIA ROSA RIBEIRO DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE BRIQUETES  
PRODUZIDOS COM BAGAÇO DE MALTE**

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

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Natália Maira Braga Oliveira

Coorientadora

**LAVRAS -MG**

**2023**

**MARIA ROSA RIBEIRO DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE BRIQUETES  
PRODUZIDOS COM BAGAÇO DE MALTE**

**EVALUATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF  
BRIQUETTES PRODUCED WITH MALT BAGASSE.**

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 25 de julho de 2023.  
Dr<sup>a</sup>. Lidja Dahiane Menezes Santos Boré UFLA  
Dr. Rafael Farinassi Mendes UFLA

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira  
Orientador

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Natália Maira Braga Oliveira  
Coorientadora

**LAVRAS -MG**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por todo apoio e incentivo a fazer boas escolhas ao longo da vida e por todo cuidado e proteção que me ajudaram a chegar até esse momento.

À minha família por todo suporte e incentivo, em especial à minha mãe, Elídia Maria e ao meu pai, Jorge Ribeiro, por não medirem esforços para que eu tivesse boas oportunidades e assim concluísse meus estudos.

Aos meus amigos de faculdade que por muitas vezes tornaram a minha jornada na graduação mais leve e me acolheram em Lavras como em uma família. Em especial, à Rayane Soares que foi uma amiga excepcional e por diversas vezes me incentivou a ser uma pessoa melhor.

Sou grata a todos os docentes da graduação, sobretudo ao meu orientador Tiago Pires e à minha coorientadora Natália Maira, por toda disponibilidade e boa vontade que demonstraram ao me auxiliar com todo o conhecimento necessário para a conclusão desse trabalho.

À Universidade Federal de Lavras pelo acolhimento e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

Grata por tudo!

## RESUMO

Resíduos industriais, como o bagaço de malte, podem ser uma excelente alternativa energética para os combustíveis sólidos convencionais por meio de sua aplicação em processos de queima direta. A partir do processo de adensamento da biomassa, é possível garantir transporte e armazenamento adequados para esse recurso. A fim de garantir que a compactação tenha resultados satisfatórios, é necessário escolher o tamanho das partículas, a temperatura e a pressão mais adequados. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo determinar a influência desses fatores na resistência à compressão e nas densidades aparente e energética de briquetes confeccionados por bagaço de malte. A princípio, a biomassa foi caracterizada conforme sua densidade, composição imediata, elementar e estrutural a fim de se avaliar as características da matéria-prima do processo de briquetagem. Os ensaios para produção dos briquetes foram realizados nas temperaturas de 80, 90 e 100 °C, nas pressões de 19, 29 e 39 MPa, e tamanho de partículas entre 0,1 e 0,5 mm (granulometria tipo A) e 0,5 e 1,0 mm (granulometria tipo B) conforme planejamento de experimentos simples de dois níveis e repetição no ponto central. A partir disso, determinou-se a densidade aparente (propriedade física) dos briquetes e sua resistência à compressão diametral (propriedade mecânica). Devido ao seu poder calorífico de 19,9 MJ/kg, o bagaço de malte mostrou ser vantajoso perante outras biomassas. E os briquetes confeccionados a partir dele apresentaram densidade energética de 24,32 GJ/m<sup>3</sup>, sendo cerca de três vezes maior que a da biomassa não compactada. O modelo completo encontrado nesse estudo é estatisticamente significativo, não indica falta de ajuste e tem coeficiente R<sup>2</sup> de 98,92%. Com ele foi encontrado um ponto de ótimo local, em que a resistência é 1,64 MPa, onde o tamanho de partícula é menor, a temperatura é 100 °C e a pressão de 39 MPa. Dessa forma, o aumento da pressão e temperatura favoreceram a resistência dos briquetes, enquanto o aumento no tamanho das partículas a prejudicou. De maneira geral, o bagaço de malte demonstrou ter poder de aplicação como combustível sólido e é indicado que o processo de adensamento seja realizado para aumentar a densidade energética dessa biomassa. Em especial nas condições do ponto de ótimo local, de 100 °C, 39 MPa e com a granulometria tipo A, que, dentre os ensaios realizados, apresentou maior resistência à compressão diametral.

**Palavras-chave:** Compactação. Biomassa. Resíduos agroindustriais. Resistência. Densidade energética.

## ABSTRACT

Industrial waste, such as malt bagasse, can be an excellent energy alternative to conventional solid fuels through its application in direct burning processes. And, through the biomass densification process, it is possible to ensure proper transportation and storage for this resource. To guarantee satisfactory compaction results, it is necessary to choose the most suitable particle size, temperature, and pressure. Thus, this study aimed to determine the influence of these factors on the compressive strength and apparent and energy densities of briquettes made from malt bagasse, through statistical planning. Initially, the biomass was characterized in terms of its density, immediate, elemental, and structural composition to evaluate the characteristics of the raw material for the briquetting process. The tests for briquette production were carried out at temperatures of 80, 90, and 100 °C, pressures of 19, 29, and 39 MPa, and particle sizes between 0,1-0,5 mm (particle size type A) and 0,5-1,0 mm (particle size type B), following a simple two-level experimental design with repetition at the central point. Based on this, the bulk density (a physical property) and diametrical compressive strength (a mechanical property) of the briquettes were determined. Due to its calorific value of 19,9 MJ/kg, malt bagasse proved to be advantageous compared to other biomasses. And the briquettes made from it exhibited an energy density of 24,32 GJ/m<sup>3</sup>, which is approximately three times higher than that of loose biomass. The complete model found in this study is statistically significant, shows no lack of fit, and has an R<sup>2</sup> coefficient of 98,92%. An optimal local point was found, where the compressive strength is 1,64 MPa, with a smaller particle size, a temperature of 100 °C, and a pressure of 39 MPa. Thus, increasing pressure and temperature favored the strength of the briquettes, while increasing the particle size hindered it. Overall, malt bagasse demonstrated its potential as a solid fuel, and it is recommended that the densification process be carried out to increase the energy density of this biomass. Specifically, under the conditions of the optimal local point at 100 °C, 39 MPa, and with particle size type A, which showed the highest diametral compressive strength among the conducted tests.

**Keywords:** Densification. Biomass. Agro-industrial waste. Strength. Energy density.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Publicações sobre briquetes de biomassa ao longo do tempo. ....	17
Figura 2 - Principais classificações de publicações sobre briquetes. ....	18
Figura 3 - Classificação das publicações do <i>Web of Science</i> em relação aos países de origem. .....	18
Figura 4 - Países que registraram patentes sobre briquetes e biomassa. ....	19
Figura 5 - Documentos registrados ao longo do tempo sobre briquetes e biomassa. ....	19
Figura 6 - Publicações sobre bagaço de malte ao longo do tempo. ....	22
Figura 7 - Publicações sobre bagaço de malte ao longo do tempo. ....	22
Figura 8 - Placas de Petri com bagaço de malte na granulometria A (a) e B (b) ....	30
Figura 9 - Molde cilíndrico usado na compressão dos briquetes (a) e prensa em funcionamento (b) ao realizar o ensaio 3 (80 °C, 39 MPa e granulometria A). ....	30
Figura 10 - Aferição da massa obtida no ensaio 1 (80°C, 19 MPa e granulometria A). ....	32
Figura 11 - Compressão diametral do briquete resultante do ensaio 12 em máquina universal de ensaio (a) e briquete com ruptura (b). ....	33
Figura 12 - Resultado do ensaio 1 (a) e do ensaio 5 (b). ....	41
Figura 13 – Fotografia obtida por microscópio digital do ensaio 1 (a) e 5 (b). ....	41
Figura 14 – Superfície de resposta da temperatura e pressão para granulometria A. ....	45
Figura 15 – Superfície de resposta da temperatura e pressão para granulometria B. ....	46
Figura 16 – Contorno de superfície de resposta decodificada de temperatura e pressão para granulometria A. ....	47
Figura 17 – Contorno de superfície de resposta decodificada de temperatura e pressão para granulometria B. ....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa granulométrica utilizadas para confecção dos briquetes. ....	29
Tabela 2 - Planejamento de experimentos para avaliação da compactação da biomassa.....	31
Tabela 3 - Somas quadráticas e seus respectivos graus de liberdade. ....	35
Tabela 4 - Análise química estrutural do bagaço de malte.....	36
Tabela 5 - Teores de lignina e holocelulose para outras biomassas .....	37
Tabela 6 - Análise imediata do bagaço de malte.....	37
Tabela 7 - Análise imediata de outras biomassas.....	38
Tabela 8 - Composição elementar do bagaço de malte. ....	39
Tabela 9 - Composição elementar de outras biomassas. ....	39
Tabela 10 - Dados de densidade <i>bulk</i> e energética da biomassa. ....	40
Tabela 11 - Dados de densidade aparente e resistência dos briquetes dos ensaios. ....	42
Tabela 12 - Coeficientes do modelo completo para cálculo da resistência. ....	44
Tabela 13 - ANOVA do modelo completo.....	44

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Gerais .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Específicos .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Biomassa e seus usos.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Composição Química Estrutural.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Composição Imediata .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Composição Elementar .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>Briquetagem .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Fatores da Compactação.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3</b>	<b>Bagaço de Malte .....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Densidade Aparente.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise da Caracterização Química Estrutural.....</b>	<b>24</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise da Composição Imediata .....</b>	<b>27</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise da Composição Elementar.....</b>	<b>27</b>
<b>4.5</b>	<b>Poder Calorífico Superior .....</b>	<b>28</b>
<b>4.6</b>	<b>Densidade Energética .....</b>	<b>29</b>
<b>4.7</b>	<b>Compactação do Bagaço de Malte .....</b>	<b>29</b>
<b>4.8</b>	<b>Densidade Aparente dos Briquetes .....</b>	<b>32</b>
<b>4.9</b>	<b>Ensaio Mecânicos .....</b>	<b>32</b>
<b>4.10</b>	<b>Estatística.....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Biomassa .....</b>	<b>36</b>
<b>5.2</b>	<b>Briquetes .....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, a biomassa teve sua aplicabilidade restrita às residências particulares e regiões agrícolas devido ao crescimento contínuo do uso de combustíveis fósseis para produção de energia. Entretanto, devido à necessidade de reduzir o consumo de derivados do petróleo e a dependência de países exportadores dessa matéria-prima, houve incentivo de alguns países para o uso de fontes de energia alternativas. Nesse contexto, a biomassa é uma opção relevante porque pode ser empregada comercialmente e tem flexibilidade para produzir energia elétrica e mover o setor de transportes (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2014).

Segundo Santos, Nascimento e Alves (2017), biomassa pode ser definida como “qualquer matéria orgânica, que possa ser transformada em energia térmica, mecânica ou elétrica”. Sua composição elementar engloba carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e, em menor teor, enxofre. Quanto aos constituintes moleculares, a hemicelulose, celulose e lignina são os principais (GUEDES *et al.*, 2010). Ademais, a biomassa tem origem em madeira, colheitas agrícolas e resíduos sólidos urbanos, sendo eles: animais, vegetais, industriais e florestais (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2014).

Resíduos agroindustriais não podem ser descartados sem tratamento no ambiente devido à sua composição rica em matéria orgânica que pode afetar o equilíbrio ecológico. Dessa forma, recomenda-se que a geração de resíduos seja reduzida ou que o resíduo seja utilizado em outros processos (MATHIAS; MELLO; SERVULO, 2014).

No contexto cervejeiro, o bagaço de malte é o resíduo sólido gerado em maior quantidade, compondo 85% dos subprodutos totais. Ademais, estima-se que a cada hectolitro de cerveja produzido cerca de 20 kg de bagaço de malte seco é gerado (FRANCISKI, *et al.*, 2018).

A produção global de cerveja no ano 2020, em relação ao ano de 2019, apresentou uma queda devido à pandemia de corona vírus. No entanto, em 2021 a indústria cervejeira se recuperou, no cenário mundial houve um crescimento de 4% e de 8% no nacional. Tendo em vista que, em 2021, a produção de cerveja global foi de 1,86 bilhões de hectolitros e, no Brasil, foi cerca de 143 milhões de hectolitros, presume-se a geração de 37,2 milhões de toneladas de resíduo de malte no mundo e 2,86 milhões de toneladas no Brasil (BARTH-HAAS GROUP, 2022; FRANCISKI, *et al.*, 2018).

O bagaço de malte é formado após a mostura e o esgotamento dos grãos de malte no processo de produção de cerveja e apresenta diversas aplicações, como por exemplo: alimentação e nutrição animal e humana; produção de energia por queima direta ou por produção de biogás via fermentação anaeróbia; produção de carvão vegetal; material adsorvente em tratamentos químicos; cultivo de micro-organismos e obtenção de bioprodutos por fermentação; além de, suporte para imobilização celular (MATHIAS; MELLO; SERVULO, 2014).

Esses resíduos de biomassa são uma alternativa energética para os combustíveis sólidos convencionais, como a lenha e o carvão, visto que são viáveis para a queima direta. No entanto, por apresentarem baixa densidade, seu transporte e armazenamento são prejudicados, demandando mais custos. Além disso, devido à elevada umidade que possuem, a queima é prejudicada, pois parte da combustão é para secar a própria biomassa. Com isso, é indicado que seja feita a compactação da biomassa no formato de briquetes ou péletes, haja vista que, pode-se reduzir o volume de 5 a 7 vezes (YAMAJI *et al.*, 2013).

Péletes e briquetes são produtos da compactação de resíduos lignocelulósicos. Enquanto o diâmetro dos péletes pode variar entre 6 e 16 mm, os briquetes possuem diâmetro superior a 50 mm. A aplicação de briquetes como substituto da lenha, por exemplo, é mais difundida que dos pellets devido à exigência de um processo com maior nível de automação e controle (DIAS, *et al.*, 2012).

Nesse viés, os briquetes têm vantagens quanto ao manuseio e transporte, possuindo baixa umidade e maior densidade energética. Devido à sua homogeneidade e a forma regular que apresentam, tem-se uma queima mais uniforme do material (RAMOS E PAULA *et al.*, 2011).

Na maioria das vezes, a compactação da biomassa é feita com a ação da temperatura e pressão. A temperatura, aplicada durante a briquetagem, faz com que a lignina haja como um ligante natural das partículas, devido à deformação plástica que ela sofre. Ademais, outros componentes como proteínas, amido, gorduras e carboidratos solúveis são considerados adesivos naturais da biomassa. Dessa maneira, pode-se dispensar o uso de aglomerantes artificiais na briquetagem (RAMOS E PAULA *et al.*, 2011).

A qualidade dos briquetes pode ser influenciada pelo tipo de biomassa, tamanho das partículas, temperatura e pressão de compactação e armazenamento. Seu desempenho, como combustível, pode ser avaliado conforme sua densidade energética (produto entre a densidade

e o poder calorífico), pois nela se resume as características físicas e químicas, sendo elas: poder calorífico, teor de cinzas e constituição química (SOUZA; VALE, 2016; YAMAJI *et al.*, 2013). Além disso, a eficácia da densificação, em relação às ligações entre as partículas, é medida em termos de resistência e durabilidade (OLIVEIRA, P; TRUGILHO; OLIVEIRA, T, 2022).

Nesse contexto, este estudo teve como objetivo determinar a influência do tamanho da partícula e da pressão e temperatura de briquetagem, parâmetros inerentes à biomassa e ao processo de fabricação, na resistência à compressão e nas densidades aparente e energética de briquetes confeccionados a partir de bagaço de malte. Com isso, visa-se determinar qual condição é mais adequada para confeccionar briquetes de bagaço de malte aplicados em processos de combustão a fim de se reduzir o descarte desse material.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Gerais**

O trabalho realizado teve como objetivo produzir briquetes a partir do aproveitamento de resíduos da produção de cerveja, o bagaço de malte, e avaliar suas propriedades físico-mecânicas e energéticas.

### **2.2 Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar o potencial para queima, identificando as propriedades físico-químicas do bagaço de malte;
- Avaliar o efeito da temperatura, pressão e tamanho das partículas sobre a compactação da biomassa de bagaço de malte.
- Analisar a qualidade da compactação, identificando as propriedades físico-mecânicas dos briquetes produzidos com bagaço de malte;
- Avaliar quantitativamente e qualitativamente a influência da temperatura, da pressão e das diferentes granulometrias nas propriedades físico-mecânicas dos briquetes por meio de um planejamento estatístico de dois níveis com repetição no ponto central.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Biomassa e seus usos

A biomassa vegetal é produto da fotossíntese, nela o gás carbônico é convertido em açúcares que, por sua vez, originam polímeros estruturais (amido, celulose, hemicelulose e lignina) (VAZ JÚNIOR *et al.*, 2013). Seu uso como fonte de energia promove o desenvolvimento de tecnologias de alta conversão e baixo custo, tem baixa emissão de gases poluentes em relação aos combustíveis fósseis e com ela são obtidos biocombustíveis de carbono neutro (OLIVEIRA, 2021).

A biomassa pode ser usada para geração de energia térmica por meio sua combustão direta ou indireta. Na combustão direta, a matéria-prima pode estar na sua forma solta ou densificada. Já a combustão indireta atua sobre os biocombustíveis gerados nos processos de digestão anaeróbio ou pirólise da biomassa (YUNUSA *et al.*, 2023).

Assim, produtos do adensamento da biomassa também podem ser aplicados nos processos de combustão direta. Ademais, estudos apontam que o processo de combustão de briquetes de biomassa tem menor emissão de gases que a queima de carvão mineral, lenha e outras matérias-primas de biomassa. Com ressalva para o uso de aglutinantes, pois no processo de adensamento, eles têm efeito significativo na emissão de gases tóxicos devido às suas composições (YUNUSA *et al.*, 2023).

Visando a produção de insumos energéticos e químicos com maior valor agregado, a biomassa pode ser aplicada em processos bioquímicos e termoquímicos. A rota bioquímica tem o intuito de produzir açúcares redutores a partir de hidrólise enzimática e, em seguida, obter biocombustíveis por meio de fermentação microbiana. Já o processo termoquímico emprega a pirólise ou gaseificação para adquirir gás de síntese ou bio-óleo. A fração sólida obtida nessa rota também pode ser usada como insumo energético ou como ferramenta de aprimoramento das propriedades do solo (OLIVEIRA, 2021).

### 3.1.1 Composição Química Estrutural

A composição básica de materiais lignocelulósicos, como a biomassa, depende da sua espécie, região de cultivo, clima, idade, período de colheita, dentre outros fatores. Esses constituintes são, principalmente, extrativos, lignina, celulose e hemicelulose. No entanto, também pode conter amido, proteínas, ácidos, sais e minerais. As fibras da biomassa são formadas por holocelulose, a qual é composta por hemicelulose e celulose. Já a lignina compõe uma matriz amorfa, de estrutura complexa e alta massa molecular que mantém as fibras unidas (BRASIL *et al.*, 2021).

A lignina confere à parede celular das plantas uma estrutura rígida, com resistência ao impacto, à compressão e à dobra. Sua estrutura complexa possui macromoléculas tridimensionais de fenilpropano e sua classificação é feita segundo a quantidade de monômeros (guaiacila, siringila e p-hidroxifenila) e de derivados de álcoois coniferílico, sinapílico e p-cumarílico. Ao contrário da celulose, somente plantas vascularizadas apresentam essa substância em sua composição (BRASIL *et al.*, 2021).

A celulose é um polímero linear de alta massa molecular que tem como monômero a glicose. Ela pode ter partes amorfas e cristalinas em sua estrutura, além de representar a macromolécula mais abundante nas plantas (BRASIL *et al.*, 2021). A celulose também é uma fonte considerável de carbono na biomassa e, apesar de não ser um bom ligante, devido à sua estrutura e elevada quantidade de ligações de hidrogênio, tal limitação pode ser eliminada com ação da temperatura (TUMULURU *et al.*, 2011).

A hemicelulose possui uma estrutura complexa, com baixa massa molecular, que promove alta absorção de água e não indica cristalinidade. Esse polissacarídeo é constituído de pentoses, hexoses, ácidos urônicos e grupos acetila (BRASIL *et al.*, 2021). A estrutura da hemicelulose é aleatória, amorfa e pouco resistente e, em contraponto, a celulose apresenta uma estrutura forte e resistente à hidrólise. Acredita-se que a degradação desse composto pode resultar em uma ligação natural das partículas (TUMULURU *et al.*, 2011).

Os extrativos são responsáveis pelo seu cheiro, cor, sabor e resistência ao apodrecimento. Eles têm baixa massa molecular e são solúveis em água e em solventes orgânicos, como etanol, acetona e diclorometano. Dentre os compostos extrativos, pode-se salientar os compostos aromáticos, terpenos, ácidos alifáticos e álcoois (BRASIL *et al.*, 2021).

As cinzas têm baixa massa molecular, são constituídas de matéria orgânica encontrada entre as cadeias carbônicas (sais, óxidos e íons metálicos) e sua magnitude indica uma redução na energia química disponível na biomassa. Além disso, em processos termoquímicos, a presença significativa de cinzas pode causar problemas operacionais e aumentar os custos com manutenção de equipamentos (BRASIL *et al.*, 2021).

### 3.1.2 Composição Imediata

Na biomassa, é possível encontrar compostos inorgânicos como silício (Si), cálcio (Ca), potássio (K), ferro (Fe), fósforo (P), alumínio (Al), sódio (Na) e magnésio (Mg) (BRASIL *et al.*, 2021). Tais elementos aparecem como óxidos na composição das cinzas da combustão da biomassa (MAGDZIARZ *et al.*, 2018).

Assim, nos compostos inorgânicos que permanecem após o processo de combustão da biomassa estão as cinzas. Seu teor pode variar conforme o material e, a depender do seu ponto de fusão, as cinzas podem se acumular e gerar corrosão nos equipamentos (MAGDZIARZ *et al.*, 2018).

Os materiais voláteis da biomassa têm influência na sua decomposição térmica e nas frações de combustão de combustíveis sólidos. Normalmente, seu teor é bastante elevado (76 a 86%) e isso faz com que a maior parte dos compostos volatizem antes de acontecer as reações de combustão, sendo que, a oxidação de gases combustíveis é mais rápida que a do carvão (OBERNBERGER; THEK, 2004).

A maior quantidade e rápida emissão de materiais voláteis favorece a ignição em temperaturas mais baixas. Nos processos de carbonização, observa-se diminuição do conteúdo de materiais voláteis e aumento do teor de carbono fixo conforme a temperatura final do processo aumenta. Isso resulta em um combustível que exige maior tempo de ignição (PROTÁSIO *et al.*, 2017). O aumento do teor de carbono fixo está associado a um produto que tem queima mais lenta e libera mais calor, favorecendo a segurança durante a combustão e o valor do combustível (HAMMERTON, 2018).

A umidade na biomassa, conforme observado por McKendry (2002), causa uma redução na sua energia disponível prejudicando seu poder calorífico. Além disso, a escolha da tecnologia de conversão também está associada à umidade. Para conversão térmica, é adequado

que o teor de umidade seja abaixo de 50%, enquanto o processo de bio-conversão admite utilização de matérias-primas com maior umidade. Com isso, nota-se que vegetais lenhosos, com pouca umidade, são eficientes na produção de combustíveis líquidos, como o metanol, por meio de processos fermentativos. Já espécies herbáceas, com alta umidade, como a cana-de-açúcar são recomendadas em processos fermentativos, como o da produção de etanol.

### **3.1.3 Composição Elementar**

A biomassa é um composto orgânico, tal como o petróleo, que se diferencia pela presença de oxigênio, nitrogênio ou enxofre em sua composição química. Dessa maneira, a sua queima é menos poluente por necessitar de menos oxigênio do ar para entrar em combustão. Em contraponto, seu poder calorífico tende a ser menor (BRASIL *et al.*, 2021). No processo de combustão os elementos carbono e hidrogênio são oxidados por reações exotérmicas, havendo a formação de dióxido de carbono e água (OBERNBERGER; THEK, 2004).

Segundo McKendry (2002), ao comparar o valor energético de combustíveis fósseis e biocombustíveis, nota-se que ele é reduzido à medida que a proporção de oxigênio e hidrogênio é maior que o teor de carbono. Tal comportamento é reflexo da maior energia contida nas ligações entre carbonos em relação às ligações de carbono com hidrogênio ou oxigênio. Portanto, quanto menor for a razão de O:C e de H:C, maior é a energia obtida do rompimento das ligações e, com isso, maior poder calorífico é observado. Ademais, conforme reportado por Obernberger e Thek (2004), concentrações de enxofre e nitrogênio na composição da biomassa devem ser limitadas, para que não haja emissões de gases poluentes (como SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO e NO<sub>2</sub>), formação depósitos e corrosão.

## **3.2 Briquetagem**

A aplicação de biomassa densificada como fonte de energia tem aumentado significativamente nos últimos anos e, a partir disso, a tecnologia de compactação tem se desenvolvido bastante. Contudo, um dos maiores desafios enfrentados por muitos países é a indisponibilidade de normas que garantam a qualidade dos briquetes. Sua aplicação é um meio

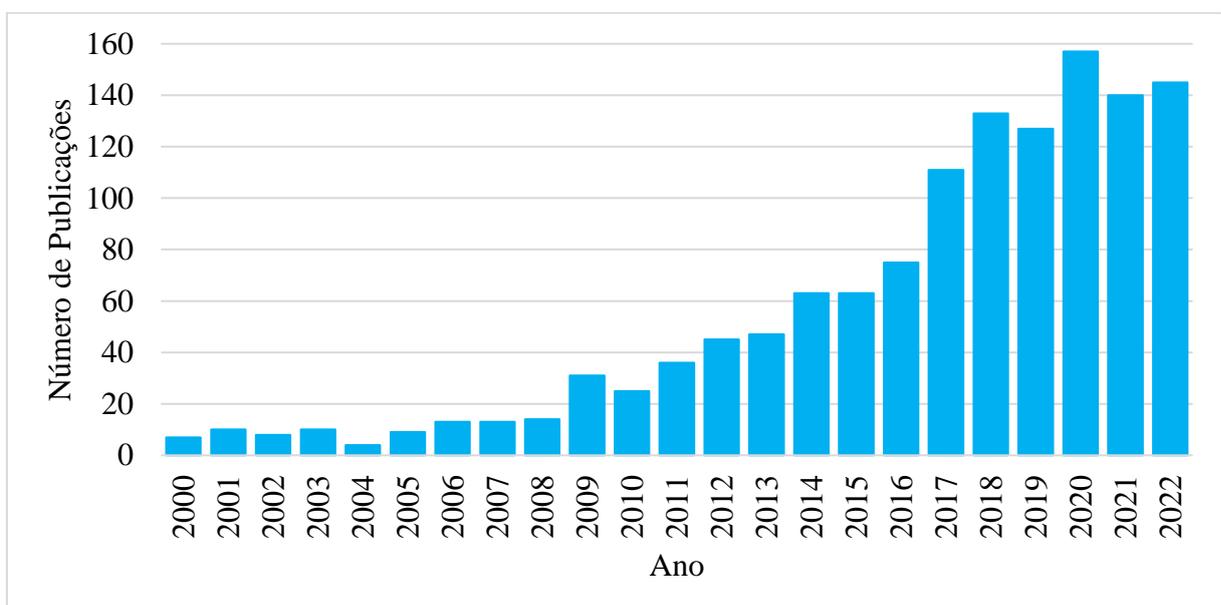
sustentável de produção de energia que tem potencial para substituir carvão mineral, lenha e carvão vegetal (YUNUSA *et al.*, 2023).

A maior parte dos estudos sobre compactação é realizada sobre pressões médias e baixas. Nessas condições, são usadas prensas manuais, por exemplo, e a produção de briquetes é baixa. Além disso, a técnica de baixa pressão é mais comum nos países em desenvolvimento porque é mais simples e acessível. Contudo, com a necessidade de se comercializar tais produtos, os estudos sobre técnicas de alta pressão se desenvolveram buscando a produção em maior escala (YUNUSA *et al.*, 2023).

Além disso, existe a possibilidade de realizar a briquetagem com mais de um material. Isso possibilita o uso de mais de uma biomassa ou a mistura da biomassa com resíduos sólidos urbanos, alimentares ou animais. A mistura de mais de uma biomassa tem se mostrado adequada para aumentar a qualidade dos briquetes. Porém, quanto à mistura com outros resíduos, deve-se ter em mente que alguns deles, como o plástico, podem gerar gases tóxicos em sua combustão (YUNUSA *et al.*, 2023).

Conforme a base de dados do *Web of Science*, uma busca pelo assunto “*briquettes of biomass*” resultou em 1333 publicações entre os anos 2000 e 2023. Isso indica que o tema tem sido alvo de cada vez mais artigos ao longo dos últimos 23 anos, sendo que em 2020 atingiu o auge com 157 publicações e, atualmente, em 2023, há 48 publicações. Tal desenvolvimento pode ser avaliado a partir do gráfico da Figura 1.

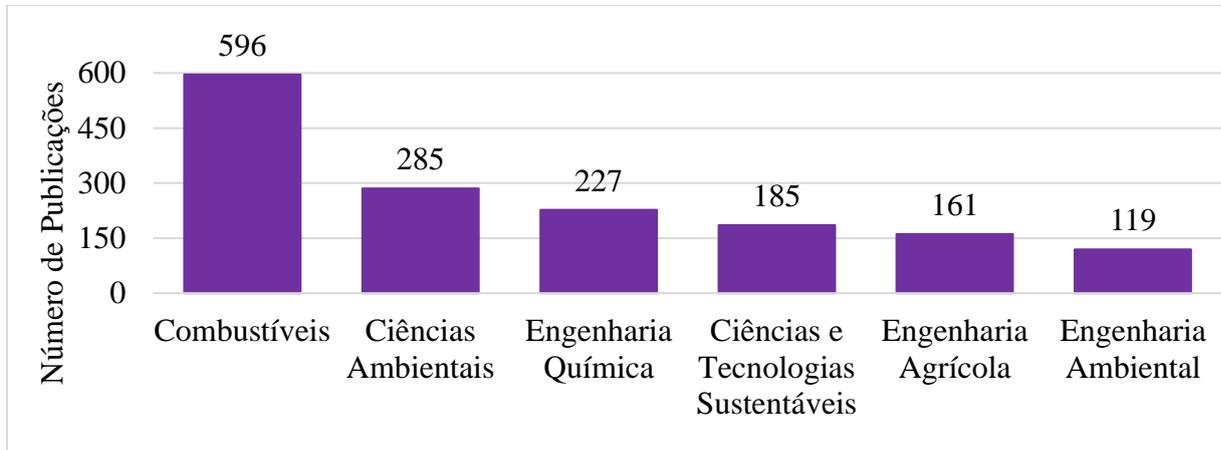
Figura 1 - Publicações sobre briquetes de biomassa ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de *Web of Science* (2023).

Tais publicações reportadas no *Web of Science* estão associadas, em sua maioria, ao escopo de combustíveis, ciência ambiental e engenharia química como indicado pela Figura 2. Ressalta-se que uma publicação pode estar associada a mais de um tema.

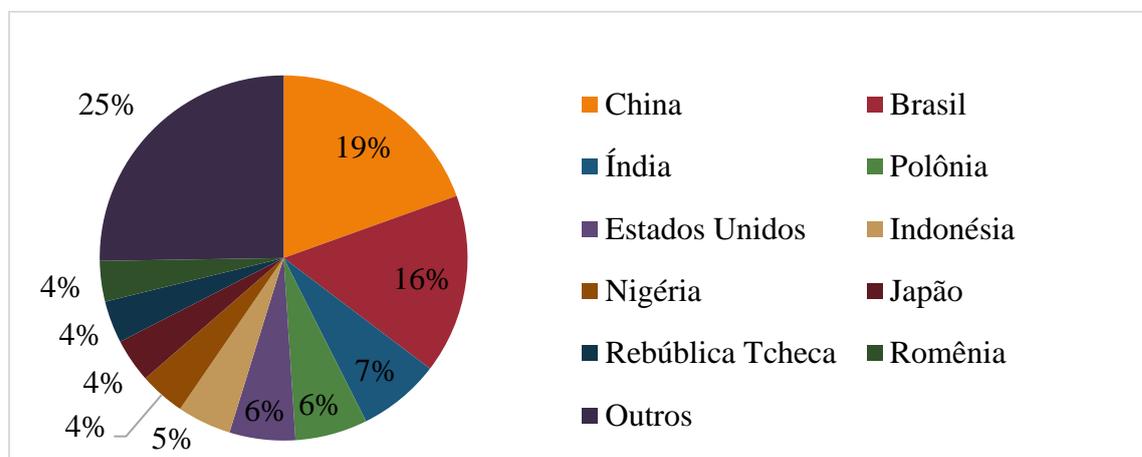
Figura 2 - Principais classificações de publicações sobre briquetes.



Fonte: Adaptado de *Web of Science* (2023).

Além disso, agrupando as publicações em relação aos países de origem percebe-se que o Brasil tem grande relevância, juntamente com a China e Índia de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Classificação das publicações do *Web of Science* em relação aos países de origem.



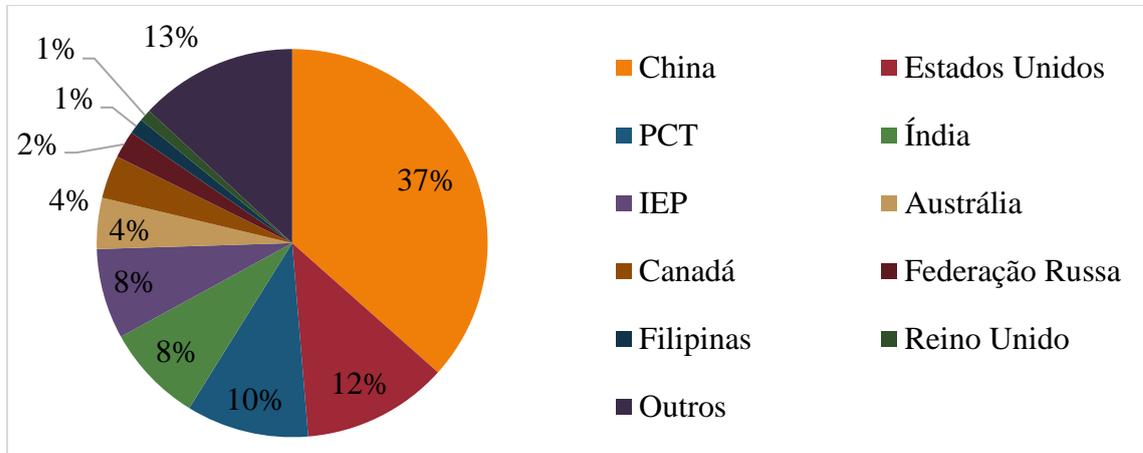
Fonte: Adaptado de *Web of Science* (2023).

Os estudos de Kaliyan e Morey (2009), Obernberger e Thek (2004) e Tumuluru *et al.* (2011) são os mais citados dos últimos 23 anos, dentre as publicações do *Web of Science*. Dessa forma, tais autores foram tomados como referência para este trabalho devido a sua relevância.

Segundo o banco de dados da *World Intellectual Property Organization* (WIPO) há 307 documentos de depósito de patente relacionados as palavras-chave “*briquettes*” e “*biomass*” no campo *Front Page*. A China, os Estados Unidos e os países associados ao Tratado de

Cooperação de Patentes (PCT) têm grande participação nesses registros de patentes, conforme é demonstrado no gráfico da Figura 4.

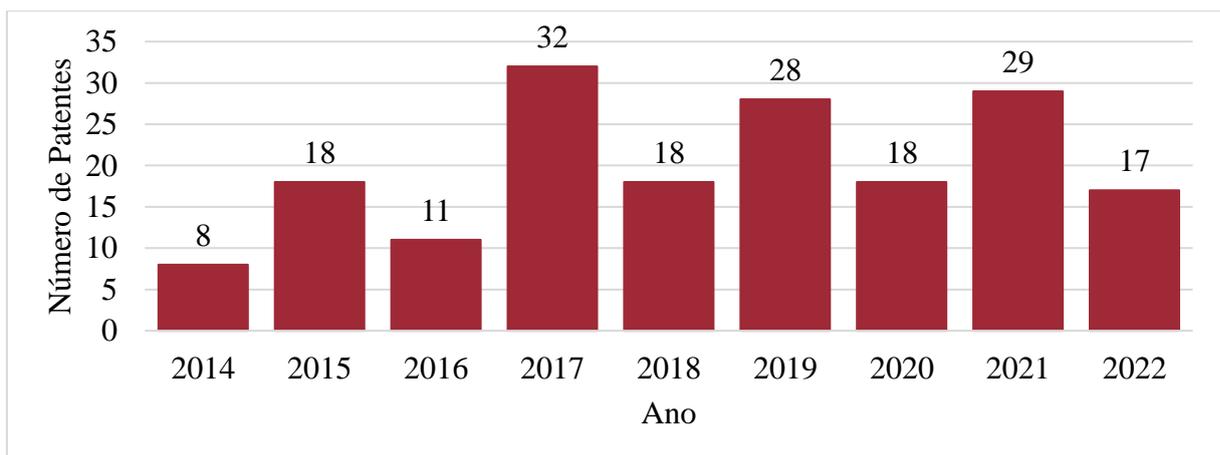
Figura 4 - Países que registraram patentes sobre briquetes e biomassa.



Fonte: Adaptado da base *WIPO* (2023).

Ademais, é possível avaliar o de número de registros de patentes sobre briquetes e biomassa ao longo do tempo, conforme a base de dados *WIPO*, pela Figura 5. Nela, vê-se que no ano de 2017 foi atingido o maior número de documentos entre 2014 e 2023, que já conta com 11 registros até julho. Ressalta-se que, dentro dos 307 registros de patentes, 190 estão distribuídos entre os anos de 2014 e 2023 indicados na Figura 5.

Figura 5 - Documentos registrados ao longo do tempo sobre briquetes e biomassa.



Fonte: Adaptado da base *WIPO* (2023).

Tais dados indicam que a compactação tem sido alvo de estudo e desenvolvimento de tecnologia ao longo dos últimos anos e apresenta bastante relevância.

### 3.2.1 Fatores da Compactação

O tamanho das partículas é um fator essencial no processo de compactação pois a sua diminuição aumenta a área superficial e a porosidade do material. Além disso, também nota-se menores limitações em relação à transferência de massa e calor entre as partículas no processo de densificação (KALIYAN, 2008). Diâmetros de partícula de 0,5 a 1,0 mm aplicados na compactação de biomassa de palha de milho, alfafa, palha de trigo e serragem geraram produtos de excelente qualidade, segundo estudo de Kaliyan e Morey (2010a).

A aplicação de pressão e temperatura elevadas desenvolve as forças entre as partículas devido à difusão de moléculas nos pontos de contato entre elas. Tais forças também são favorecidas quando há cristalização de algum componente, reação química, endurecimento de ligantes, solidificação de componentes liquefeitos (KALIYAN; MOREY, 2009).

A pressão a que a biomassa é exposta durante a briquetagem tem um impacto significativo na densidade e durabilidade do produto, assim como no consumo de energia do processo. Apesar de se identificar melhoras nas propriedades mecânicas (resistência à compressão e durabilidade) dos briquetes conforme a pressão aumenta, alguns estudos, identificaram que, quando esse aumento atinge um limite, a energia resultante dessa força pode ser convertida em calor e não contribuir com a qualidade do produto (STELTE, *et al.*, 2012).

Pressões altas, de até 69 MPa, produzem briquetes densos e duráveis, enquanto, pressões baixas, de até 28 MPa, geram produtos frágeis (KALIYAN, 2008). Ao mesmo tempo, nota-se que quanto maior a temperatura atingida, menor é a força necessária para realizar a compactação e a durabilidade do briquete aumenta (KALIYAN, 2008). A pressão a que a biomassa é exposta durante a briquetagem tem um impacto significativo na densidade e durabilidade do produto, assim como no consumo de energia do processo (STELTE, *et al.*, 2012).

Componentes da biomassa, como lignina, proteínas, amido e gorduras podem ser ativados, através de aquecimento no processo de adensamento, e atuar como aglutinantes. Isso ocorre quando o calor fornecido no adensamento é suficiente para atingir a faixa de transição vítrea da lignina, entre 75 e 100 °C (KALIYAN; MOREY, 2010b; TUMULURU, *et al.*, 2011). No entanto, foi observado por Kaliyan and Morey (2009) que, na madeira, quando o teor de lignina e extrativos extrapola 34% a durabilidade e resistência dos produtos do adensamento não é favorecida pela ação adesiva da lignina termicamente amolecida. Além disso, conforme

Tumuluru *et al.* (2011), temperaturas maiores que 110 °C causam degradação química da biomassa e com isso, a superfície dos briquetes tem aparência carbonizada.

A umidade também é um fator importante no processo de briquetagem. Segundo Kaliyan e Morey (2009), quando abaixo de 10%, em base mássica, a umidade não afeta a durabilidade dos briquetes. Porém, teores acima de 12% de umidade na biomassa afetam negativamente a durabilidade dos seus respectivos produtos na compactação. Com disso, o excesso de umidade é associado ao enfraquecimento das ligações entre as partículas e por isso a redução na durabilidade é justificada.

A resistência e durabilidade dos produtos da densificação são parâmetros, comumente, associados à sua qualidade. Para determiná-los é necessário realizar testes de resistência à compressão, resistência à abrasão ou resistência à água. No teste de resistência à compressão (esmagamento ou dureza), se determina a carga máxima que o briquete suporta antes de ceder. Com isso, os briquetes são posicionados individualmente entre duas placas planas e paralelas que o pressionam à taxa constante até o corpo de prova romper. Dessa forma, se obtém uma curva de tensão-deformação até o momento da quebra (OLIVEIRA, 2021).

### **3.3 Bagaço de Malte**

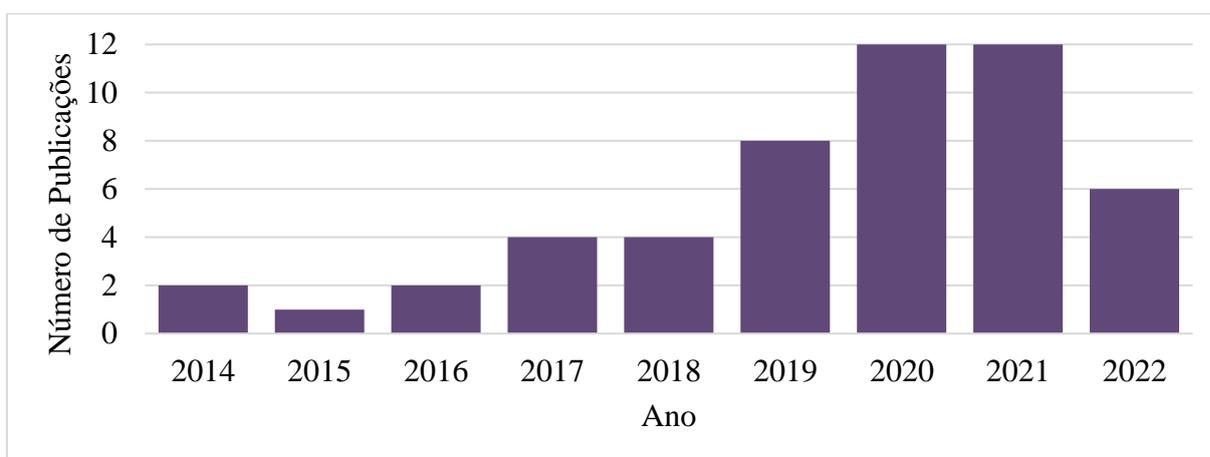
O malte é matéria-prima no processo de produção da cerveja e é resultado da germinação de qualquer cereal sob condições controladas. O bagaço de malte é o resíduo constituído de grãos de cevada maltados que passaram por filtração na indústria cervejeira o qual contém alto teor de umidade e açúcares. Devido a sua composição, esse resíduo tem grande potencial de deterioração e, com isso, é descartado comumente em aterros sanitários ou utilizado como ração animal (BORÉL, 2018).

A composição desse resíduo pode apresentar diferenças devido à variedade de cevada, época de colheita, condições de maltagem, brassagem e complementos adicionados no processo cervejeiro. O bagaço de malte é, principalmente, a casca dos grãos de cevada, sendo assim, um material lignocelulósico que contém açúcares polimerizados em celulose e hemicelulose (MUSSATO; ROBERTO, 2006).

O aproveitamento dessa biomassa para aplicação como biocombustível é relevante para as cervejarias devido à disponibilidade desse material lignocelulósico à custo baixo durante todo o ano (BORÉL, 2018).

Conforme a base de dados do *Web of Science*, uma busca pelo assunto “*malt bagasse*” resultou em 59 publicações entre os anos 2014 e 2023, que já conta com 8 publicações até julho. O desenvolvimento dessas publicações pode ser avaliado a partir do gráfico da Figura 6.

Figura 6 - Publicações sobre bagaço de malte ao longo do tempo.

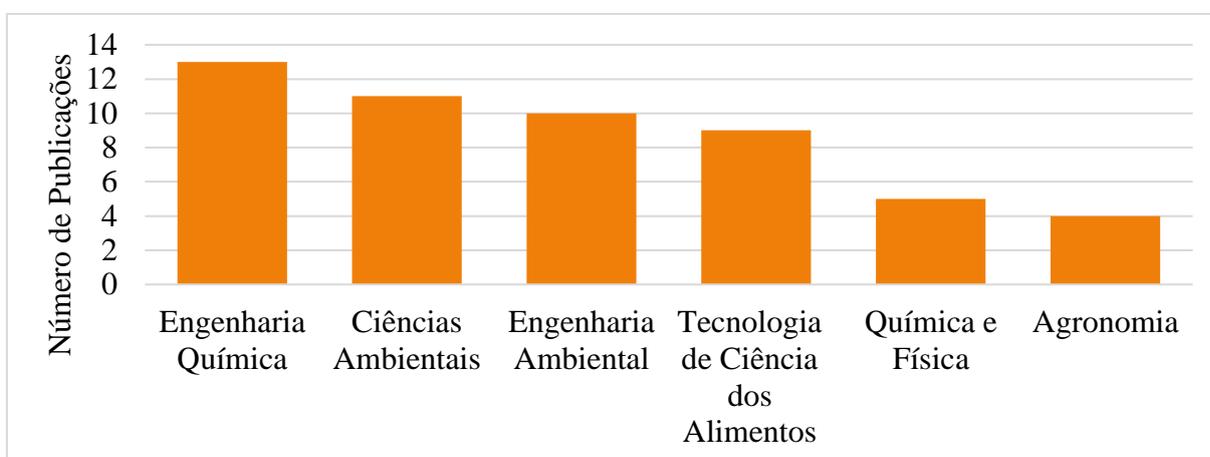


Fonte: Adaptado de *Web of Science* (2023).

Nota-se pela Figura 6 que o ápice de publicações ocorreu, recentemente, em 2020 e 2021, com 12 publicações.

Tais estudos reportados no *Web of Science* estão associadas, em sua maioria, ao escopo da engenharia química, ciência ambiental e engenharia ambiental como indicado pela Figura 7. Ressalta-se que uma publicação pode estar associada a mais de um tema.

Figura 7 - Publicações sobre bagaço de malte ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de *Web of Science* (2023).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A biomassa utilizada na confecção dos briquetes e nas análises foi fornecida pelo Núcleo de Estudos em Cerveja Artesanal (NucBeer) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais. O bagaço de malte, predominantemente cevada, foi coletado imediatamente após uma batelada para produção de cerveja e, em seguida, foi submetido à secagem em estufa a 105 °C por 24 horas no Laboratório de Operações e Sistemas Térmicos (LOST) da mesma universidade.

### 4.1 Densidade Aparente

Para a determinação da densidade aparente do bagaço de malte, foi usada a técnica de picnometria e, para isso, a princípio, o picnômetro foi calibrado. Com isso, em um béquer de 250 mL foi inserido aproximadamente 150 mL de água deionizada. Após atingir o equilíbrio térmico à temperatura ambiente, com o auxílio de um termômetro foi mensurada a temperatura da água. Assim, determinou-se a densidade teórica da água nessa temperatura.

O picnômetro vazio e seco foi pesado cuidadosamente e sua massa foi anotada. Completou-se o picnômetro com a água deionizada de maneira que o excesso de água escorresse pelo capilar ao tampá-lo. Nessa etapa, observou-se se bolhas de ar não ficaram aprisionadas no interior do picnômetro. O picnômetro com água foi seco externamente com papel toalha e, posteriormente, pesado. A diferença entre essa massa e a massa do picnômetro vazio permitiu a determinação da massa de água contida no picnômetro. Com a densidade da água foi possível determinar o volume real do picnômetro. O procedimento foi feito em triplicata.

Utilizou-se éter de petróleo na picnometria devido à leveza da amostra. Dessa forma, adicionou-se éter de petróleo ao picnômetro para ambientá-lo. Após isso, o picnômetro foi completado por éter até que o excesso escorresse pelo capilar ao tampá-lo. Em seguida, o picnômetro foi seco com papel toalha e sua massa foi anotada. Dessa maneira, determinou-se a densidade do éter de petróleo a partir da diferença da massa do picnômetro vazio e completo de éter e do volume do picnômetro obtido na calibração.

Para a determinação da densidade das amostras de bagaço de malte não moído, inicialmente, o picnômetro foi lavado com álcool. Assim, a amostra foi inserida no picnômetro seco e, posteriormente, o conjunto (picnômetro e amostra) foi pesado. Em seguida, éter de petróleo foi adicionado cuidadosamente no picnômetro, evitando-se a formação de bolhas, até preenchê-lo, de maneira que o excesso de éter escorresse pelo capilar ao tampá-lo. Com papel, o picnômetro foi seco externamente e, por fim, sua massa contendo a amostra e éter de petróleo foi anotada. O procedimento foi feito em triplicata.

Dessa forma, a densidade da amostra ( $d$ ) foi determinada conforme a Equação 1.

$$d = \frac{m_2 - m_1}{V_p - V_e} = \frac{m_2 - m_1}{\frac{(m_4 - m_1)}{d_a} - \frac{(m_3 - m_2)}{d_e}} \quad (1)$$

Sendo:

$m_1$ : Massa do picnômetro vazio e seco;

$m_2$ : Massa do picnômetro com amostra de biomassa seca;

$m_3$ : Massa do picnômetro com amostra de biomassa seca completado com éter de petróleo;

$m_4$ : Massa do picnômetro completo por água deionizada;

$d_a$ : Densidade da água deionizada;

$d_e$ : Densidade do éter de petróleo;

$V_e$ : Volume de éter de petróleo adicionado à biomassa;

$V_p$ : Volume do picnômetro.

#### 4.2 Análise da Caracterização Química Estrutural

Para a análise química estrutural foram determinados os teores de extrativos totais, lignina insolúvel, cinzas, holocelulose e teor de lignina total por diferença. A fração utilizada para estas análises passou pela peneira de 40 *mesh* e ficou retida na peneira de 60 *mesh* e todas os procedimentos foram realizados em quadruplicata. O teor de extrativo total foi determinado conforme a NBR 14853 (ABNT, 2010), substituindo o etanol/tolueno por acetona. Para a quantificação dos extrativos totais foram adicionados cerca de 7 g de bagaço de malte ( $Ms$ ), em

coadores de TNT previamente aferidos, em seguida foi feita a extração em aparelho *Soxhlet*, localizado no Laboratório de Materiais Compósitos da UFLA, por aproximadamente 5 horas, em solução de acetona.

Posteriormente, o material lignocelulósico foi lavado com água quente até que o filtrado se tornou incolor. Em seguida, o material foi seco em estufa a  $105 \pm 2$  °C por aproximadamente 10 horas ( $M_{sext}$ ), para a quantificação dos materiais extraíveis feita por diferença de massa, conforme a Equação 2. O material livre de extrativos foi utilizado para as demais análises químicas.

$$Text (\%) = \frac{Ms - M_{sext}}{Ms} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

Text: Teor de extrativo (%);

Ms: Massa seca (g);

Msext: Massa seca sem extrativo (g).

O teor de lignina insolúvel foi determinado conforme a NBR 7989 (ABNT, 2003b). Para isso, cerca de 2 g de material livre de extrativos ( $Ma$ ) foi inserido em um béquer junto com 15 mL de solução de ácido sulfúrico 72%. Em seguida, as amostras foram levadas a banho maria a  $30 \pm 0,2$  °C por aproximadamente 2 horas. Após esse tempo, as misturas foram transferidas para um béquer maior e foram diluídas em água deionizada até completar 500 mL.

Posteriormente, os béqueres foram colocados em chapas aquecedoras, onde permaneceram em aquecimento por aproximadamente 5 horas. Após resfriadas, as misturas foram filtradas em um cadinho de vidro com placa porosa, previamente preparado com uma camada de polpa de celulose umedecida. A lignina retida no cadinho foi lavada com água deionizada até completa remoção do ácido sulfúrico. Em seguida, os cadinhos com as amostras foram levados na estufa a  $105 \pm 2$  °C até massa constante ( $Mr$ ). O teor de lignina insolúvel em ácido foi obtido conforme a Equação 3.

$$\% L(ins) = \frac{Mr}{Ma} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

L(ins): Teor de lignina insolúvel (%);

Mr: Massa do resíduo (g);

Ma: Massa da amostra inicial (g).

A determinação da porcentagem de cinzas foi feita de acordo com a NBR 13.999 (ABNT, 2003a), substituindo-se o cadinho de platina por cadinho de porcelana. Para isso, pesou-se cerca de 2g de bagaço de malte que foi adicionado ao cadinho de porcelana previamente aferidos, em seguida as amostras foram inseridas em uma mufla com taxa de aquecimento de 1,67 °C/min, à 525 °C permanecendo por 3 horas. Após esse tempo, os cadinhos foram inseridos no dessecador por aproximadamente 30 minutos e, posteriormente, foram pesados para a determinação da massa residual. O teor de cinzas (*Tcz*) foi obtido por diferença de massa inicial e massa final do bagaço de malte em relação à massa inicial.

A holocelulose foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Salim e Wahab (2008). Em primeiro momento, pesou-se 2,5 g da amostra sem extrativos (*Msext*) em balança semi-analítica, que foi adicionada em um Erlenmeyer juntamente com 55 mL de água deionizada a temperatura ambiente, 3 ml de solução clorito de sódio (30%) e 2 mL de ácido acético (20%). O Erlenmeyer tampado com cadinho de porcelana foi levado ao banho-maria à 70 °C por 4 horas, sendo que a cada 45 minutos foi adicionado 3 mL de solução clorito de sódio (30%) e 2 mL de ácido acético (20%) à mistura. Ao final, a mistura foi filtrada em cadinho de porosidade 2, com uma camada fina de polpa de celulose, com água gelada e 15 mL de metanol. Após o conjunto secar em estufa a 103°C e esfriar em dessecador (*Mholo*), determinou-se o teor de holocelulose pela Equação 4.

$$Tholo (\%) = \frac{Mholo}{Msext} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

Tholo: teor de holocelulose (%);

Msext: Massa sem extrativos (g);

Mholo: Massa de holocelulose (g).

O teor de lignina total (*Tlig*) foi determinado conforme a Equação 5.

$$Tlig = 100 - (Tholo + Text + Tcz) \quad (5)$$

### 4.3 Análise da Composição Imediata

Para a determinação do conteúdo de umidade, aproximadamente 1g de da amostra de bagaço de malte foi inserida em um cadinho previamente aferido, que em seguida foi levado a uma estufa a  $105\pm 1$  °C até a massa permanecer constante. Posteriormente, as amostras foram mantidas por aproximadamente 30 minutos em dessecador e, em seguida, pesadas novamente para a quantificação da massa seca.

As mesmas amostras foram utilizadas para a determinação do conteúdo volátil (MV), onde foram inseridas em mufla à temperatura de  $950\pm 10$  °C.

Para isso, primeiro os cadinhos foram tampados e colocados sobre a porta da mufla por 2 minutos. Em seguida, os cadinhos foram inseridos na mufla a parte mais externa (próximo a porta) por 3 minutos e, posteriormente, foram inseridos totalmente na mufla e permaneceram por mais 6 minutos com a porta fechada. Posteriormente, os cadinhos foram levados para o dessecador, onde permaneceram por 1 hora. Após resfriadas, as amostras foram pesadas novamente para a determinação da massa restante, sendo que a diferença obtida na massa corresponde ao conteúdo volátil.

Para a quantificação das cinzas (CZ) os cadinhos foram destampados e inseridos na mufla fria, sendo aquecidos lentamente até 750 °C, onde permanecendo nesta temperatura por aproximadamente 6 horas. Logo após, foram transferidos para o dessecador, permanecendo por aproximadamente 1 hora. Em seguida, os cadinhos foram pesados para a quantificação da massa restante. O teor de carbono fixo (CF) foi determinado por diferença.

### 4.4 Análise da Composição Elementar

A análise química elementar foi feita em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), onde foram quantificados os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre em relação à massa seca de bagaço de malte. Para a análise foi utilizada a fração que passou pela peneira de 200 *mesh* e ficou retida na peneira de 270 *mesh*. Aproximadamente 2 mg de material foi inserido em uma cápsula de estanho e, posteriormente, incinerado a 1200 °C. Após quantificação o percentual de oxigênio foi obtido por diferença, conforme a Equação 6.

$$O = 100 - C - H - N - S - CZ \quad (6)$$

Em que:

O: Teor de oxigênio (%);

C: Teor de carbono (%);

H: Teor de hidrogênio (%);

N: Teor de nitrogênio (%);

S: Teor de enxofre (%);

CZ: Teor de cinzas (%).

#### 4.5 Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior (PCS) da amostra foi estimado a partir das correlações propostas por Parikh *et al.* (2005) e Yin (2011), utilizando os valores obtidos na análise imediata, conforme as Equações 7 e 8, respectivamente:

$$PCS \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 0,3536 CF + 0,1559 MV - 0,078 CZ \quad (7)$$

$$PCS \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 0,1905 MV + 0,2521 CF \quad (8)$$

Em que:

CF: Carbono fixo (%);

MV: Material volátil (%).

Ademais, as correlações propostas por Sheng e Azevedo (2005) e Demirbas (1997) foram usadas para calcular o poder calorífico superior a partir dos valores obtidos na análise elementar, conforme as Equações 9 e 10, respectivamente:

$$PCS \left( \frac{MJ}{kg} \right) = -1,3675 + 0,3137 C + 0,7009 H + 0,0318 O \quad (9)$$

$$PCS \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 0,335 C + 1,423 H - 0,154 O - 0,145 N \quad (10)$$

#### 4.6 Densidade Energética

Para a determinação da densidade energética da biomassa, foram utilizados os dados de densidade *bulk*, aferida como descrito no item 4.7, e do poder calorífico superior da biomassa. Com isso, a densidade energética foi obtida de acordo com a Equação 11.

$$Energia \left( \frac{GJ}{m^3} \right) = DB \times PCS \quad (11)$$

DB: Densidade *bulk* da biomassa em g/cm<sup>3</sup>;

PCS: Poder calorífico superior do bagaço de malte em MJ/kg.

A densidade energética dos briquetes foi determinada de maneira semelhante utilizando a densidade aparente dos briquetes e o poder calorífico da biomassa.

#### 4.7 Compactação do Bagaço de Malte

No Laboratório de Processos de Separação Mecânica (LPSM), o bagaço de malte passou por moagem em um moinho de facas e peneiramento, utilizando peneiras padronizadas de acordo com a norma ABNT NBR NM 248/200316, com auxílio do peneirador vibratório e peneiras de 18 *mesh*, 35 *mesh* e 140 *mesh*. Na Tabela 1 estão dispostas as faixas granulométricas utilizadas na confecção dos briquetes, bem como, suas denominações.

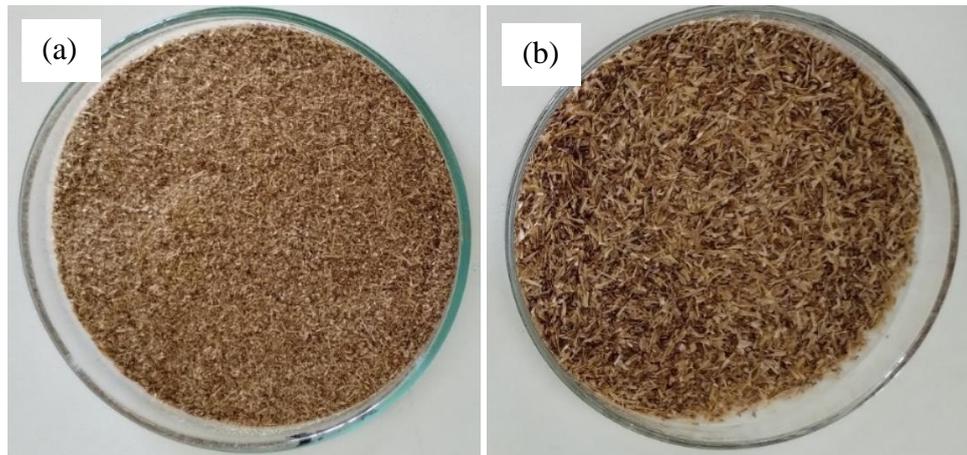
Tabela 1 - Faixa granulométrica utilizadas para confecção dos briquetes.

Nomenclatura	- D ( <i>mesh</i> )	+ D ( <i>mesh</i> )	- D (mm)	+ D (mm)
B	18	35	1,0	0,5
A	35	140	0,5	0,1

Fonte: Da autora (2023).

Ademais, na Figura 8 pode-se observar as diferentes granulometrias mencionadas na Tabela 1.

Figura 8 - Placas de Petri com bagaço de malte na granulometria A (a) e B (b)



Fonte: Da autora (2023).

Com isso, a densidade *bulk* de cada granulometria foi aferida. Para sua determinação uma proveta foi preenchida por bagaço de malte até a marca de 100 mL e, posteriormente, seu peso foi determinado. Assim, a densidade *bulk* foi obtida pela razão entre a massa de biomassa necessária para preencher a proveta e seu volume.

Aproximadamente 60 g da biomassa moída foi inserida em um molde cilíndrico de aço inox com diâmetro interno de 7 cm (D) e 10 cm de altura, indicado na Figura 9a, para ser compactada em uma prensa hidráulica com aquecimento, marca Matolli – 370M015, localizada no Laboratório de Materiais Compósitos da UFLA, representada, pela Figura 9b.

Figura 9 - Molde cilíndrico usado na compressão dos briquetes (a) e prensa em funcionamento (b) ao realizar o ensaio 3 (80 °C, 39 MPa e granulometria A).



Fonte: Da autora (2023).

A pressão, temperatura e a granulometria de cada ensaio seguiram o planejamento de experimentos indicado na Tabela 2, no entanto, é importante ressaltar que a ordem de realização dos experimentos foi de modo aleatório.

A aleatorização é recomendada para evitar a ocorrência de distorção dos resultados estatísticos. Com isso, ela impede que desvios incomuns sejam associados a combinações de níveis específicas (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

Tabela 2 - Planejamento de experimentos para avaliação da compactação da biomassa.

<b>Ensaio</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pressão (MPa)</b>	<b>Granulometria</b>
1	80	19	A
2	100	19	A
3	80	39	A
4	100	39	A
5	80	19	B
6	100	19	B
7	80	39	B
8	100	39	B
9	90	29	A
10	90	29	A
11	90	29	A
12	90	29	B
13	90	29	B
14	90	29	B

Fonte: Da autora (2023).

O planejamento de experimentos da Tabela 2 é de dois níveis, três fatores (temperatura, pressão e granulometria) e tem três repetições no ponto central para cada tipo de faixa granulométrica.

Normalmente, os pontos centrais são aplicados para fatores quantitativos. Contudo, quando há variáveis qualitativas, os pontos centrais são realizados em um dos dois níveis dessa variável (MONTGOMERY, 2017), ou em ambos, como apresentado na Tabela 2.

O valor superior e inferior propostos para a temperatura tem o intuito de atingir a faixa de transição vítrea da lignina, entre 75 e 100 °C, segundo Kaliyan and Morey (2010b). Já a pressão foi posta de acordo com o equipamento utilizado (Figura 9b), que atinge no máximo 64 MPa, no entanto não é recomendado atingir 70% de sua capacidade.

Com intuito de comparar com o estudo de Kaliyan e Morey (2010a), no qual afirma-se que diâmetros de partícula de 0,5 a 1,0 mm, aplicados na compactação, geraram produtos de

boa qualidade, uma faixa granulométrica menor foi proposta. Para, assim, avaliar o efeito da diminuição das partículas.

#### 4.8 Densidade Aparente dos Briquetes

A densidade aparente dos briquetes foi calculada seguindo o método de estereometria por medição direta, proposto por Palermo *et al.* (2012). Dessa maneira, foi necessário aferir a massa dos briquetes em uma balança semi-analítica (Figura 10) e sua espessura com um paquímetro. A partir da espessura e diâmetro dos briquetes, que foi definido pelo molde, é possível determinar seu volume e, com isso, a densidade pode ser expressa pela razão entre a massa dos briquetes e seu volume geométrico.

Figura 10 - Aferição da massa obtida no ensaio 1 (80°C, 19 MPa e granulometria A).



Fonte: Da autora (2023).

#### 4.9 Ensaios Mecânicos

Em uma máquina universal de ensaios, modelo WDW-20E (Figura 11a), localizada no Departamento de Ciências Florestais da UFLA, foram feitos os ensaios de compressão diametral, seguindo a metodologia utilizada por Hansted *et al.* (2016), exceto pela alteração na quantidade de ensaios. Para a determinação da força máxima (em kN), os quatorze corpos de prova foram inseridos na plataforma de teste e pressionados a 3,5 mm/min até a sua ruptura.

Dessa maneira, a resistência à compressão ( $\sigma_t$ ), em MPa, pode ser determinada pela Equação 12.

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot L} \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

Em que:

D: diâmetro do briquete (m);

L: comprimento (m).

Figura 11 - Compressão diametral do briquete resultante do ensaio 12 em máquina universal de ensaio (a) e briquete com ruptura (b).



Fonte: Da autora (2023).

#### 4.10 Estatística

O planejamento de experimentos foi aplicado com intuito de avaliar os fatores que afetam a compactação, mais mencionados em outros estudos, sendo eles, pressão, temperatura e tamanho das partículas. O efeito deles sobre a densidade e resistência à compressão, parâmetros associados à qualidade dos briquetes, foi quantificado a fim de encontrar um ponto ótimo.

Segundo Neto, Scarminio e Bruns (2001), é necessário realizar a codificação de variáveis para se calcular os efeitos dos fatores em um planejamento de experimentos.

Nesse contexto, para codificar as variáveis temperatura e pressão foi utilizada a Equação 13.

$$V_c = \frac{V - V_m}{(V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})/2} \quad (13)$$

Em que:

$V_c$ : variável codificada;

$V$ : variável original;

$V_m$ : média entre o valor inferior e o valor superior que a variável atinge;

$V_{m\acute{a}x}$ : valor superior que a variável atinge;

$V_{m\acute{i}n}$ : valor inferior que a variável atinge.

As faixas granulométricas indicadas na Tabela 1 são, para este estudo, fatores qualitativos. Nesse sentido, a faixa granulométrica denominada A assume o valor de -1, quando codificada, e a granulometria B, de 1.

A matriz codificada ( $X$ ) e o vetor de respostas experimentais ( $y$ ) são utilizados, segundo Neto, Scarminio e Bruns (2001), para o ajuste do modelo estatístico pelo método dos mínimos quadrados. Para tal fim, é necessário determinar o vetor de coeficientes do modelo ( $b$ ) conforme a Equação 14.

$$b = (X^T X)^{-1} \cdot X^T y \quad (14)$$

A multiplicação da matriz  $X$  pelo vetor  $b$  resulta no vetor de respostas do modelo ( $\hat{y}$ ).

Com intuito de analisar o modelo estatístico, é feita a Análise da Variância (ANOVA) para o planejamento de experimentos simples de dois níveis, três fatores e com repetição no ponto central. Para tal fim, são determinadas as somas quadráticas e seus respectivos graus de liberdade conforme a Tabela 3, em que:

$y_i$ : elementos que compõem o vetor  $y$ ;

$\bar{y}$ : média dos elementos de  $y$ ;

$\bar{y}_i$ : média de cada uma das respostas experimentais com relação às suas repetições;

$\hat{y}_i$ : elementos que constituem o vetor  $\hat{y}$ ;

$n$ : número de níveis distintos da variável independente;

$N$ : número total de observações;

$p$ : número de parâmetros do modelo.

Tabela 3 - Somas quadráticas e seus respectivos graus de liberdade.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Nº de graus de liberdade
Total	$SQ_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$	$N - 1$
Regressão	$SQ_R = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$
Resíduos	$SQ_r = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$	$N - p$
Falta de Ajuste	$SQ_{faj} = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$n - p$
Erro Puro	$SQ_{ep} = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$	$N - n$

Fonte: Adaptado de Neto, Scarminio e Bruns (2001).

As médias quadráticas também constituem a ANOVA e são determinadas pela razão entre as somas quadráticas e seus respectivos graus de liberdade.

Os pontos centrais foram adicionados para avaliar se o modelo gerado é linear ou não. A repetição de experimentos nesse ponto permite que o desvio devido ao erro puro (experimentais) e à falta de ajuste sejam quantificados.

Conforme Neto, Scarminio e Bruns (2001), o coeficiente  $R^2$  do modelo é a razão entre a soma quadrática da regressão e a soma quadrática total. Ele indica a porcentagem de variação explicada pelo modelo. A porcentagem máxima explicável ( $R_{m\acute{a}x}$ ) é dada pela Equação 15.

$$R_{m\acute{a}x} = (SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T \quad (15)$$

Segundo Montgomery (2017), a razão entre a média quadrática da regressão e dos resíduos ( $F_{calculado,1}$ ) deve exceder o valor da distribuição F, na confiança determinada ( $\alpha$ ) para os graus de liberdade da regressão e dos resíduos ( $F_{\alpha; p-1; N-p}$ ), para que o modelo possa ser estatisticamente significativo.

De forma semelhante, a razão entre a média quadrática da falta de ajuste e do erro puro ( $F_{calculado,2}$ ) deve ser menor que o valor da distribuição F, na confiança determinada para os graus de liberdade da falta de ajuste e do erro puro ( $F_{\alpha; n-p; N-n}$ ), para não indicar falta de ajuste do modelo (MONTGOMERY, 2017).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Biomassa

A densidade aparente encontrada para o bagaço de malte não moído foi de  $1,19 \pm 0,02$  g/cm<sup>3</sup>. Comparando com outros estudos, esse valor é semelhante ao obtido por Silva (2018) de 1,19 g/cm<sup>3</sup>, para resíduo de malte de cevada *in natura*, indicando certa coerência aos dados obtidos nesse estudo.

De modo geral, a densidade aparente da biomassa favorece valor energético dos seus briquetes, segundo Silva *et al.* (2009), e à resistência mecânica (elasticidade), de acordo com Oliveira *et al.* (2012).

Para o teor de extrativos, cinzas, lignina total, lignina insolúvel e holocelulose obteve-se os valores indicados na Tabela 4.

A análise estrutural do bagaço de malte de Maione (2019) determinou valores de extrativos, lignina total e insolúvel em ácido, holocelulose e cinzas próximos aos encontrados neste estudo, os quais, também, estão destacados na Tabela 4. Indicando que os dados obtidos são semelhantes aos reportados na literatura.

Tabela 4 - Análise química estrutural do bagaço de malte.

<b>Compostos</b>	<b>Do autor (2023)</b>	<b>Maione (2019)</b>
Extrativos (%)	29,5 <sup>0,1</sup>	30,261
Cinzas (%)	2,9 <sup>0,2</sup>	3,381
Lignina Total (%)	21,1	20,332
Lignina Insolúvel (%)	16,9 <sup>0,5</sup>	15,436
Holocelulose (%)	46 <sup>1,1</sup>	46,026

Fonte: Da autora (2023).

A presença de estruturas moleculares complexas, como a lignina, hemicelulose, celulose e extrativos indicam que a biomassa pode ser transformada em energia por meio de processos, químicos, termoquímicos ou bioquímicos (YUNUSA *et al.*, 2023).

Em outros estudos reportados foram encontrados dados sobre os teores de lignina e holocelulose para outras biomassas, os quais estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Teores de lignina e holocelulose para outras biomassas

<b>Biomassa</b>	<b>Lignina Total</b>	<b>Holocelulose</b>
Eucalipto	30,11 %	69,69 %
Casca de arroz	26,95 %	55,83 %
Bambu	25,79 %	73,67 %
Bagaço de cana	24,86 %	70,31 %
Casca de pinhão-manso	30,11 %	69,69 %

Fonte: Adaptado de Macêdo (2012).

Em comparação com os estudos de Macêdo (2012), a biomassa em estudo apresenta teor de lignina total menor que biomassa de eucalipto, casca de arroz, casca de pinhão-manso, bambu e bagaço de cana. Quanto ao teor de holocelulose, o bagaço de malte também tem menor porcentagem em relação às biomassas citadas.

Além disso, os extrativos estão associados a uma melhor ignição nos estágios iniciais da combustão da biomassa e sofrem alteração a depender das condições de clima e solo onde se planta e colhe a biomassa. Para o caroço de açaí, por exemplo, são apresentados valores de 2,2%, 12,58% e 16,64%, todos inferiores ao de bagaço de malte deste trabalho (OLIVEIRA, P; TRUGILHO; OLIVEIRA, T; 2022).

Para o teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo determinou-se, por análise imediata, os valores indicados na Tabela 6. Tais resultados estão relativamente próximos aos encontrados por Schmitt (2021) para o bagaço de malte, também indicados na tabela mencionada.

Tabela 6 - Análise imediata do bagaço de malte.

<b>Compostos</b>	<b>Da autora (2023)</b>	<b>Schmitt (2021)</b>
Umidade (%)	7,1 <sup>0,3</sup>	2,4
Materiais Voláteis (%)	76,2 <sup>0,2</sup>	80,5
Cinzas (%)	2,96 <sup>0,02</sup>	3,0
Carbono Fixo (%)	20,8 <sup>0,2</sup>	16,5

Fonte: Da autora (2023).

A análise imediata do bagaço de malte em estudo pode ser comparada com os valores obtidos por Lima (2004), Diniz (2005), Katyal, Thambimuthu e Valix (2003) e Werther *et al.* (2000) para as biomassas de sabugo de milho, de casca de arroz, de bagaço de cana e de resíduo de soja, respectivamente, por meio da Tabela 7.

Tabela 7 - Análise imediata de outras biomassas.

<b>Compostos</b>	<b>Sabugo de Milho</b>	<b>Casca de arroz</b>	<b>Bagaço de Cana</b>	<b>Resíduo de Soja</b>
Umidade (%)	17,1	7,9	8,2	6,3
Materiais Voláteis (%)	87,4	59	83,1	69,6
Cinzas (%)	1,1	22,6	11,3	5,1
Carbono Fixo (%)	18,32	16,7	15,0	19,0

Fonte: Adaptado de Lima (2004), Diniz (2005), Katyal, Thambimuthu e Valix (2003) e Werther *et al.* (2000).

Em comparação com os resultados dos autores mencionados na Tabela 7, o teor de umidade da biomassa deste estudo é inferior ao do sabugo de milho, ao de casca de arroz e ao do bagaço de cana. No entanto, a umidade do bagaço de malte é ligeiramente superior a dos resíduos de soja. De forma geral, é interessante que a biomassa tenha umidade relativamente baixa pois ela influencia negativamente na quantidade de calor liberada na combustão (DE LIMA; ABDALA; WENZEL, 2008).

Em relação ao teor de materiais voláteis, a biomassa de bagaço de malte deste estudo possui um teor de materiais voláteis maior que a casca de arroz e os resíduos de soja e menor que o bagaço de cana e o sabugo de milho.

O teor de cinzas das biomassas da Tabela 7 se mostrou ser maior que da biomassa de bagaço de malte deste estudo, exceto quanto ao teor de cinzas da biomassa de sabugo de milho. Dessa forma, o uso do bagaço de malte para queima é interessante quando comparado às biomassas citadas pois cinzas são indesejadas no processo de combustão.

O teor de carbono fixo do bagaço de malte é relativamente maior que as seguintes biomassas mencionadas na Tabela 7: casca de arroz e bagaço de cana, resíduos de soja e sabugo de milho. Essa característica é benéfica pois o teor de carbono fixo está vinculado a uma queima mais lenta, característica interessante para o uso como combustível (STURION; PEREIRA; CHEMIN, 1988).

Para o teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio obteve-se os valores indicados na Tabela 8. A composição elementar encontrada por Schmitt (2021) para a biomassa de bagaço de malte também está destacada na Tabela 8 e, no tocante às análises, foi semelhante a encontrada neste trabalho.

Tabela 8 - Composição elementar do bagaço de malte.

<b>Elementos</b>	<b>Da autora (2023)</b>	<b>Schmitt (2021)</b>
Carbono (%)	50,63	47,5
Hidrogênio (%)	6,66	5,9
Nitrogênio (%)	6,15	4,2
Enxofre (%)	0,17	0,7
Oxigênio (%)	33,43	42,9

Fonte: Da autora (2023).

Nos estudos de Nogueira e Rendeiro (2008) foi determinada a composição elementar das biomassas de casca de arroz, pinheiro e caroço de açaí. Para fins de comparação, tais dados foram destacados na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição elementar de outras biomassas.

<b>Elementos</b>	<b>Casca de Arroz</b>	<b>Pinheiro</b>	<b>Caroço de Açaí</b>
Carbono (%)	38,24	59	46
Hidrogênio (%)	4,40	7,2	6
Nitrogênio (%)	0,80	32,7	0,8
Enxofre (%)	0,06	1,1	-
Oxigênio (%)	35,50	42,9	46

Fonte: Adaptado de Rendeiro e Nogueira (2008)

Ao analisar a Tabela 9, percebe-se que a composição elementar do bagaço de malte deste estudo favorece mais a queima quando comparada à casca de arroz e ao caroço de açaí por ter mais carbono disponível em relação à quantidade de oxigênio. Quanto à emissão de gases indesejados, o teor de nitrogênio e enxofre pode indicar que a queima de bagaço de malte pode gerar mais poluentes que a casca de arroz e o caroço de açaí.

A partir da Equação 7, foi possível estimar o poder calorífico superior (PCS) com os dados da análise imediata do bagaço de malte deste estudo (Tabela 6). Com isso, o valor obtido foi de  $19,22^{0,04}$  MJ/kg. O mesmo se deu para a Equação 8, resultando em  $19,77^{0,01}$  MJ/kg. O poder calorífico superior também foi calculado com relação à análise elementar do bagaço de malte deste estudo (Tabela 8), a partir das Equações 9 e 10, resultando em 20,25 MJ/kg e 20,40 MJ/kg, respectivamente.

Percebe-se que os valores calculados são semelhantes, independente das correlações e tipo de análise. Ademais, o valor médio ( $19,9 \pm 0,5$  MJ/kg) é próximo à média encontrada por

Fiebig (2022) em seus cálculos de PCS para a biomassa de bagaço de malte a partir de correlações de dados da análise imediata, sendo,  $19,1 \pm 0,5$  MJ/kg.

De acordo com o estudo de Fiebig (2022), o poder calorífico superior do bagaço de malte supera o de diversas biomassas como: madeira de bambu (18,66 MJ/kg), casca de coco de babaçu (18,84 MJ/kg), bagaço de cana seco (18,25 MJ/kg), madeira da espécie Pinho (18,84 MJ/kg), casca de amêndoas (18,79 MJ/kg), casca de sementes de girassol (17,99 MJ/kg) e caroço de azeitona (18,99 MJ/kg).

## 5.2 Briquetes

A densidade energética da biomassa para cada granulometria foi obtida a partir da Equação 11, considerando o poder calorífico médio calculado anteriormente e a densidade *bulk*, sendo os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados de densidade *bulk* e energética da biomassa.

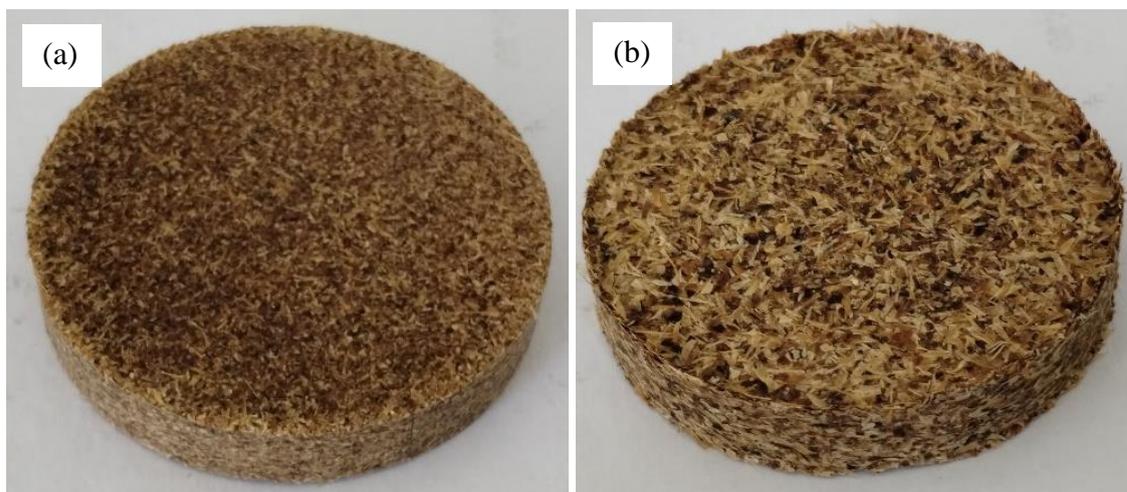
<b>Granulometria</b>	<b>Densidade <i>Bulk</i> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade Energética (GJ/m<sup>3</sup>)</b>
A	0,397 <sup>0,005</sup>	7,91
B	0,359 <sup>0,014</sup>	7,14

Fonte: Da autora (2023).

Ao analisar a Tabela 10, nota-se um aumento da densidade *bulk* ao reduzir o tamanho das partículas devido à diminuição dos espaços vazios entre elas. No entanto, essa diferença é pouco expressiva. O mesmo comportamento é observado para a densidade energética, dado que as duas grandezas são diretamente proporcionais, conforme a Equação 11. De forma semelhante, a fibra de coco estudada por Simões *et al.* (2022) também apresentou maior densidade *bulk* e energética a medida que o tamanho das partículas foi reduzido.

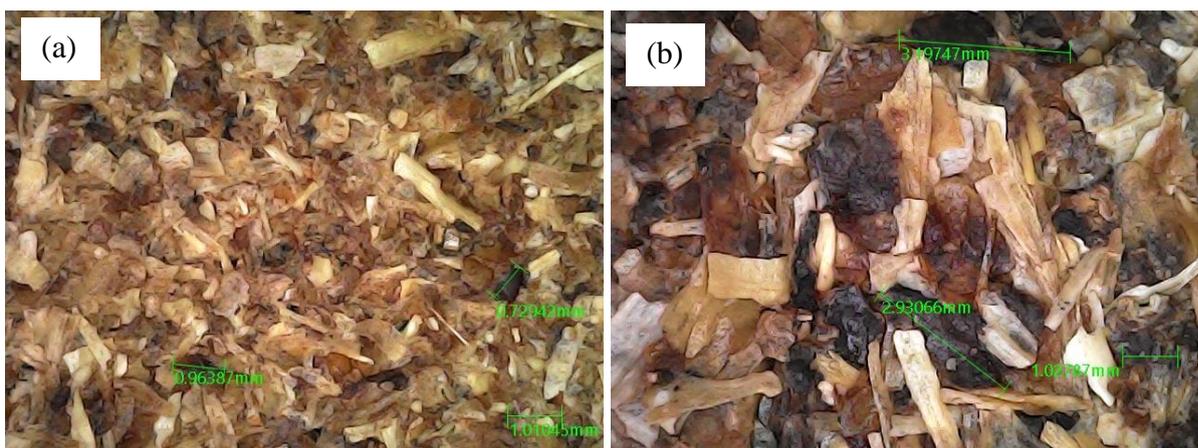
Na Figuras 12 e 13 é possível visualizar os briquetes que são resultados dos ensaios 1, na granulometria A, e 5, na granulometria B, conforme descrito na Tabela 2. Na Figura 13, tem-se uma imagem obtida por microscópio digital.

Figura 12 - Resultado do ensaio 1 (a) e do ensaio 5 (b).



Fonte: Da autora (2023).

Figura 13 – Fotografia obtida por microscópio digital do ensaio 1 (a) e 5 (b).



Fonte: Da autora (2023).

De forma geral os briquetes tinham boa aparência, não esfarelavam e estavam aparentemente bem compactados. Porém, como se pode observar pela Figura 12a, o briquete do ensaio 1 apresenta uma superfície mais uniforme e lisa que o 5 (Figura 12b), sendo que na compactação o único fator que os distingue é a granulometria. Além disso, é possível observar que os poros indicados no ensaio 1 (Figura 13a) são menores que os poros do ensaio 5 (Figura 13b). Nesse sentido, a granulometria mais fina garantiu um aspecto mais uniforme (Figura 12a) e poros menores (Figura 13a) aos produtos do adensamento deste estudo.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos e de densidade aparente dos briquetes de acordo com o planejamento experimental.

Tabela 11 - Dados de densidade aparente e resistência dos briquetes dos ensaios.

Ensaio	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Granulometria	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência (MPa)
1	80	19	A	1,181	0,85
2	100	19	A	1,165	0,78
3	80	39	A	1,229	0,85
4	100	39	A	1,233	1,64
5	80	19	B	1,218	0,69
6	100	19	B	1,219	0,98
7	80	39	B	1,243	0,92
8	100	39	B	1,266	1,09
9	90	29	A	1,260	1,11
10	90	29	A	1,199	1,01
11	90	29	A	1,224	1,37
12	90	29	B	1,234	0,97
13	90	29	B	1,236	1,08
14	90	29	B	1,191	1,21

Fonte: Da autora (2023).

De acordo com a Tabela 11, a densidade aparente permanece muito próxima independente de qualquer mudança na temperatura, pressão e granulometria dos ensaios para a faixa em que os experimentos foram realizados. Com isso, o modelo completo gerado para a densidade apresentou todos os efeitos como não significativos a 95% de confiança.

A densidade aparente dos briquetes em comparação com a densidade *bulk* da biomassa, na Tabela 10, apresentou um aumento expressivo porque a compactação minimizou os espaços vazios entre as partículas aumentando a densidade. O mesmo comportamento foi observado por Simões *et al.* (2022), para a biomassa de fibra de coco, em que a densidade *bulk* das partículas mais finas foi 0,194 g/cm<sup>3</sup> e seus respectivos briquetes atingiram 0,838 g/cm<sup>3</sup>.

Levando em conta que o valor médio das densidades dos briquetes é  $1,22 \pm 0,03$  g/cm<sup>3</sup>, tem-se que a densidade energética dos mesmos é 24,32 GJ/m<sup>3</sup>. Valor cerca de 3,1 vezes maior que o da biomassa não compactada na faixa granulométrica A e cerca de 3,4 vezes maior que na faixa granulométrica B (Tabela 10). Isso significa que o adensamento da biomassa de bagaço de malte concentrou o poder energético da biomassa em um volume menor favorecendo seu poder de queima, como esperado.

Smith *et al.* (1977) obteve briquetes de palha de trigo com densidades de 1,2 a 1,3 g/cm<sup>3</sup> aplicando temperaturas de 80 a 140 °C para um tempo de aquecimento de 40 min. Ao comparar com a compactação do bagaço de malte, nota-se que essa faixa abrange a densidade aparente encontrada e a temperatura adotada.

Ao comparar com os briquetes de resíduos agrofloretais estudados por Souza e Vale (2016), percebe-se que a densidade energética dos briquetes de bagaço de malte é maior que dos briquetes de cumaru (19,54 GJ/m<sup>3</sup>), tauari (18,87 GJ/m<sup>3</sup>), bagaço de cana (18,12 GJ/m<sup>3</sup>) e torta de pinhão manso (17,32 GJ/m<sup>3</sup>). Portanto, os briquetes de bagaço de malte são mais vantajosos para geração de energia.

Briquetes produzidos com bagaço de malte não moído apresentaram, nos estudos de Silva (2018), densidade energética de 20,50 GJ/m<sup>3</sup>. Quando comparado aos briquetes de bagaço de malte moído deste estudo (24,32 GJ/m<sup>3</sup>), percebe-se que a densidade energética aumentou com a diminuição do tamanho das partículas.

Os ensaios nos pontos centrais, do planejamento de experimentos (Tabela 2), deveriam apresentar valores intermediários em relação aos outros ensaios e com pouco desvio em relação às suas repetições. Ao avaliar a Tabela 11, percebe-se que a resistência dos briquetes 11 e 14 são as mais distantes do restante sendo responsáveis por aumentar o desvio. Aliás, esse último ensaio destoa dos ensaios 12 e 13 não só quanto à resistência, mas também quanto à densidade. Além disso, a resistência do ensaio 12 é muito próxima do máximo encontrado para a granulometria B. Tais desvios observados podem ser associados às adversidades experimentais, como a regulação manual da prensa ou problemas de transferência de calor no molde indicado na Figura 9a.

Nesse contexto, o modelo foi gerado com os 10 primeiros ensaios (N) considerando também que a granulometria A provavelmente é mais favorável. A partir disso, o modelo para avaliação dos fatores na resistência à compressão diametral apresentou coeficiente R<sup>2</sup> mais adequado. Tal modelo pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficientes do modelo completo para cálculo da resistência.

	<b>Coeficientes (MPa)</b>	<b>95% inferiores (MPa)</b>	<b>95% superiores (MPa)</b>
Interseção (M)	0,980	0,899	1,060
Temperatura (T)	0,147	0,059	0,235
Pressão (P)	0,149	0,061	0,237
Granulometria (G)	-0,060	-0,140	0,021
T.P	0,094	0,006	0,182
T.G	-0,032	-0,120	0,056
P.G	-0,065	-0,153	0,023
T.P.G	-0,121	-0,209	-0,033

Fonte: Da autora (2023).

Ao analisar a Tabela 12, constata-se que com a confiança de 95% somente os coeficientes da temperatura, pressão, da interação entre elas e entre os três fatores são estatisticamente significativos. Porém, o modelo enxuto gerado por eles não apresenta bom ajuste dos dados. Dessa forma, o modelo completo é mais apropriado, sendo o adotado. O modelo completo apresenta coeficiente  $R^2$  de 98,92%, sendo essa, a porcentagem de variação explicada pelo modelo. Ao comparar com a porcentagem máxima de variação explicável, determinada pela Equação 15, de 99,19%, pode-se dizer que há um bom ajuste.

A ANOVA associada ao modelo completo pode ser observada na Tabela 13. Os graus de liberdade indicados nela foram determinados a partir da Tabela 3 considerando que  $p$  é igual a 8 (número de coeficientes) e  $n$  é igual a 9 (combinações de níveis).

Tabela 13 - ANOVA do modelo completo.

	<b>SQ (MPa<sup>2</sup>)</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>MQ (MPa<sup>2</sup>)</b>
Total	0,621	9	-
Regressão	0,615	7	0,088
Resíduos	0,007	2	0,003
Falta de ajuste	0,002	1	0,002
Erro puro	0,005	1	0,005

Fonte: Da autora (2023).

Conforme indicado no item 4.10, considerando os graus de liberdade da Tabela 13, o modelo é estatisticamente significativo a 95% de confiança porque o  $F_{\text{calculado},1}(26,3)$  é maior

que  $F_{0,25;7;2}$  (19,4). Além disso, o modelo não indica falta de ajuste pois o  $F_{\text{calculado},2}$  (0,3) é menor que  $F_{0,95;1;1}$  (161,4). Posto isso, pôde-se exibir o modelo completo pela Equação 16.

$$y = 0,980 + 0,147T + 0,149P - 0,060G + 0,094TP - 0,032TG - 0,065PG - 0,121TPG \quad (16)$$

Onde  $y$  é a resistência à compressão diametral em MPa e  $T$ ,  $P$  e  $G$  são as variáveis codificadas associadas à temperatura, pressão e granulometria, respectivamente.

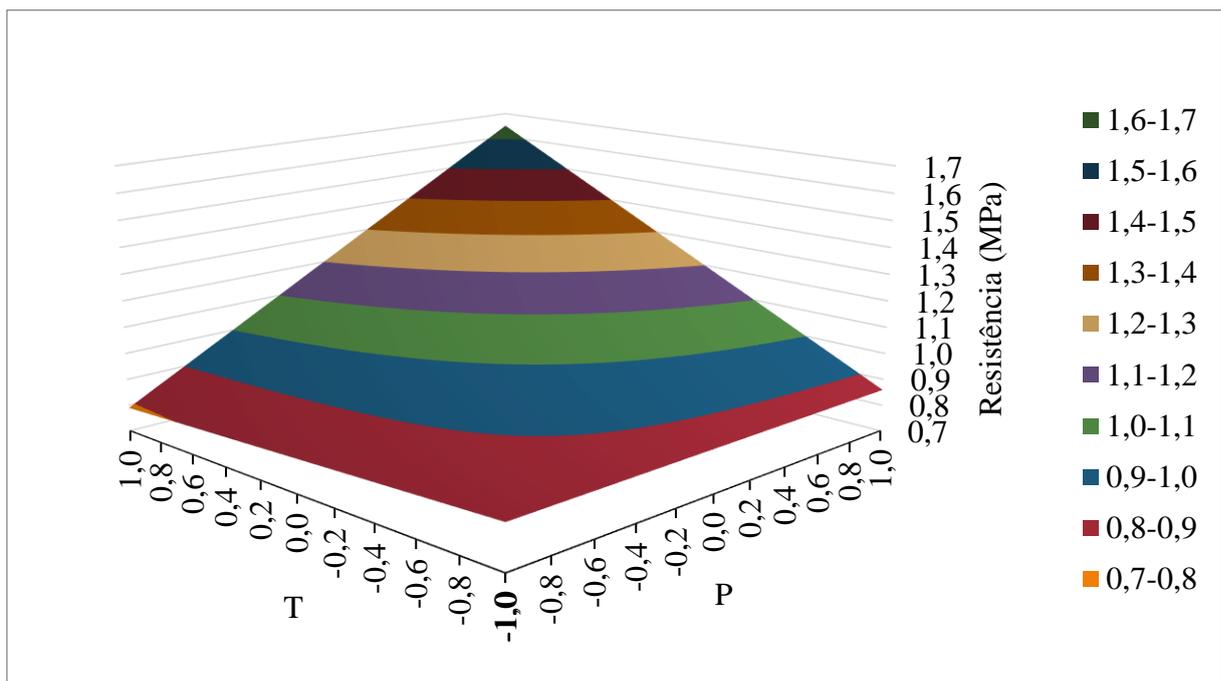
A granulometria nesse estudo é um fator qualitativo e, por isso, deve assumir somente os valores 1 e -1. Dessa maneira, a partir da Equação 16, foram obtidas as Equações 17 e 18, para as granulometrias A e B, respectivamente.

$$y = 1,040 + 0,179T + 0,214P + 0,060 + 0,215TP \quad (17)$$

$$y = 0,920 + 0,115T + 0,084P - 0,060 - 0,027TP \quad (18)$$

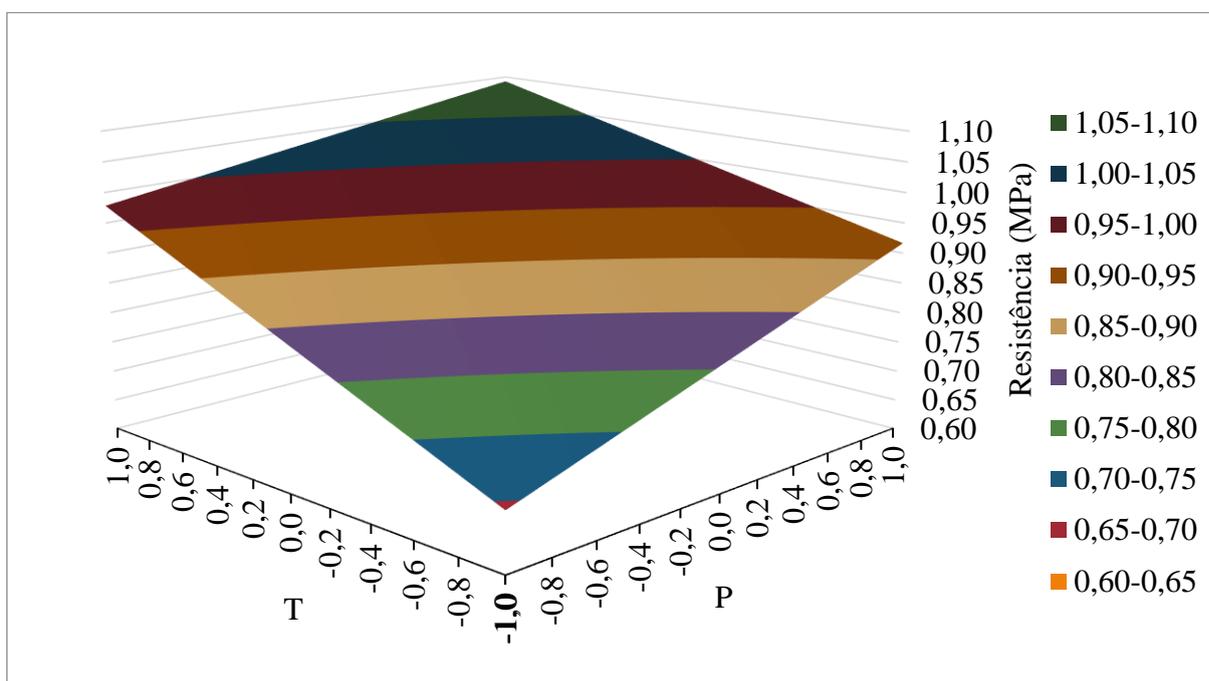
A partir da Equação 17 pode-se perceber que, quando o tamanho das partículas é menor, a temperatura e a pressão favorecem a resistência dos briquetes a medida em que são maiores. Já a Equação 18, que exibe o modelo para partículas maiores, apresenta coeficiente negativo para a interação entre  $T$  e  $P$ , enquanto seus coeficientes individuais são positivos. Isso dificulta a análise a partir da própria equação, sendo assim foram esboçadas superfícies de resposta para as Equações 17 e 18 nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14 – Superfície de resposta da temperatura e pressão para granulometria A.



Fonte: Da autora (2023).

Figura 15 – Superfície de resposta da temperatura e pressão para granulometria B.

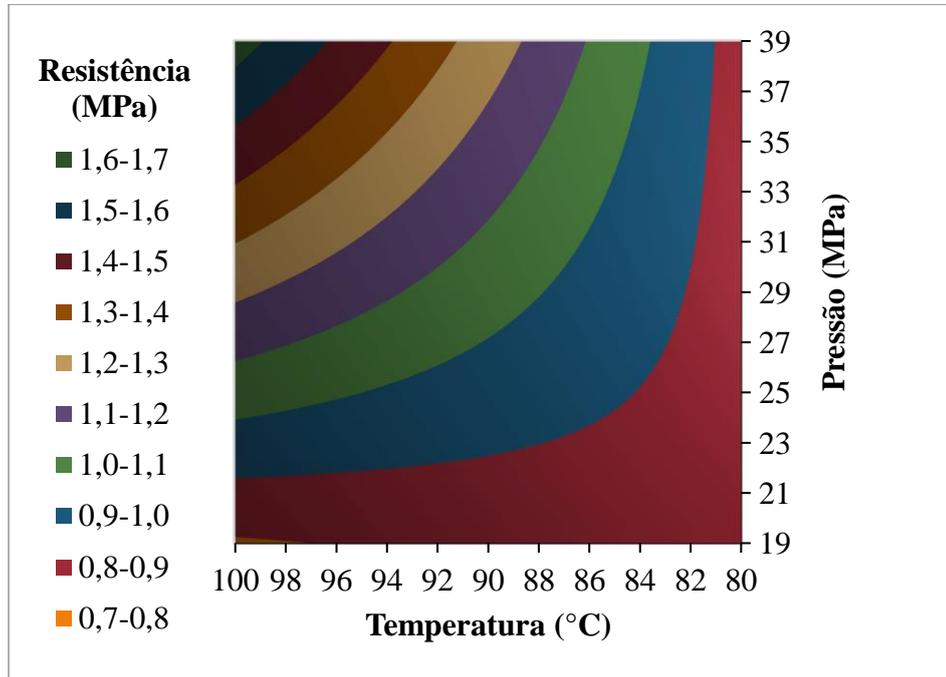


Fonte: Da autora (2023).

A partir das superfícies de resposta das Figuras 14 e 15, observa-se que o aumento da temperatura e pressão beneficiam a resistência dos briquetes na faixa em que os experimentos foram realizados. Além disso, pode-se ver que há máximos locais onde a pressão e temperatura estão no nível 1 para os dois tipos de granulometria. Dessa forma, a resistência é maximizada quando a temperatura é 100 °C, a pressão 39 MPa. A superfície gerada a partir da Equação 17 (Figura 14) atinge uma faixa de valores de resistência (1,6 – 1,7 MPa) maior que a superfície da Figura 15 (1,05 – 1,10 MPa), posto isso, infere-se que a granulometria mais fina é mais recomendada para aumentar a resistência à compressão diametral. Quanto aos coeficientes de pressão e temperatura nas Equações 17 e 18, é possível notar que a temperatura tem maior efeito que a pressão, na resistência, quando o tamanho das partículas é maior. Em contrapartida, quando os briquetes foram produzidos com partículas mais finas, os efeitos da pressão (0,214 MPa), sobre a resistência, foram maiores que da temperatura (0,179 MPa).

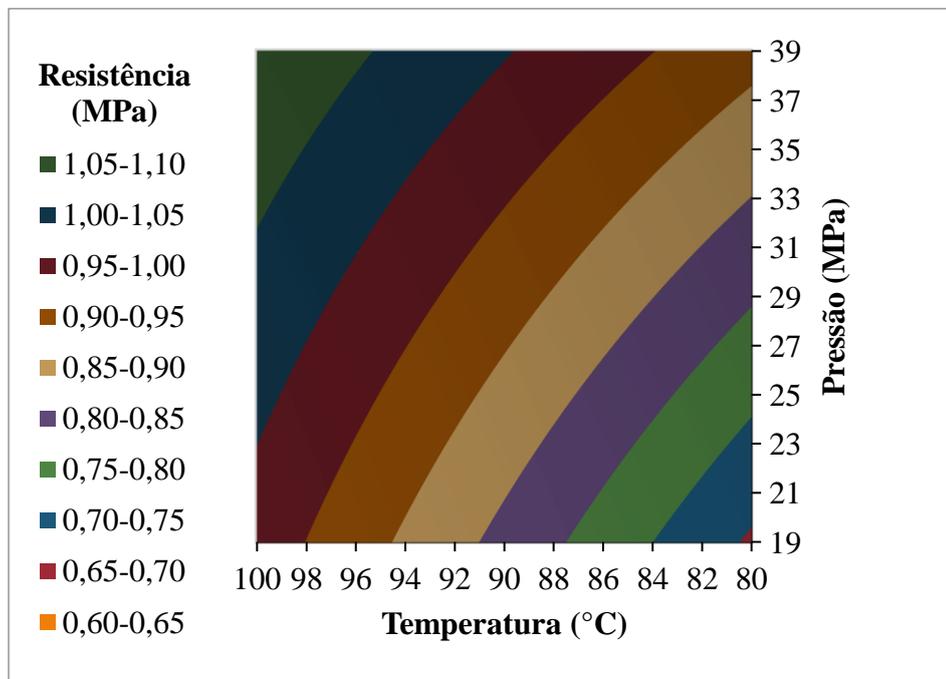
A partir da Equação 13, aplicando os valores definidos na Tabela 2, foi possível exibir os contornos das superfícies de resposta das Figuras 14 e 15 em função das variáveis não codificadas. Tais contornos, para a granulometria A e B estão destacadas nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 – Contorno de superfície de resposta descodificada de temperatura e pressão para granulometria A.



Fonte: Da autora (2023).

Figura 17 – Contorno de superfície de resposta descodificada de temperatura e pressão para granulometria B.



Fonte: Da autora (2023).

A partir das Figuras 16 e 17, é possível reafirmar que os maiores valores de resistência à compressão diametral são observados quando a temperatura e a pressão se aproximam dos seus valores superiores.

Segundo Silva (2018), a resistência mecânica favorece o transporte, empilhamento e armazenamento de briquetes, por isso, é uma característica importante. Em seu estudo sobre briquetes de bagaço de malte notou-se que a diminuição do tamanho de partículas aumentou a resistência mecânica em relação aos briquetes de bagaço de malte não moído.

De forma geral, partículas menores devem aumentar a qualidade dos briquetes. Nesse viés, estudos reportados sobre resíduos florestais relataram que partículas de 1,7 mm geraram produtos adensados mais consistentes que os fabricados com partículas de 5 mm. Além disso, pesquisas relatam que a densificação de resíduos de madeira a pressões de 34 a 138 MPa resultaram em um aumento da resistência ao impacto e à compressão dos briquetes (KALIYAN, 2008).

De acordo com o planejamento de experimentos realizado por Oliveira, P., Trugilho e Oliveira, T. (2022), os briquetes de caroço de açaí se mostraram mais resistentes à medida que a pressão aumentava entre 15 e 25 MPa. Isso se deve ao aumento da pressão de compactação incentivar deformações plásticas e elásticas, difusão de moléculas e minimização de espaços vazios entre as partículas. Especialmente, em 160 °C, os autores notaram que o aumento da resistência foi favorecido devido à influência da temperatura sobre a deformação plástica da lignina que auxilia na adesão entre as moléculas.

Não é possível identificar nas superfícies de resposta das Figuras 14 e 15 qualquer concavidade que indique um ponto ótimo global. Com isso, para futuros experimentos, é indicado o deslocamento pelo método de maior inclinação que, segundo Montgomery e Runger (2003), é uma alternativa para se mover rapidamente em direção à vizinhança do ponto ótimo global.

Dessa maneira, recomenda-se uma sequência de ensaios deslocados em relação à temperatura e à pressão, mantendo a granulometria com melhor desempenho, tipo A. Para isso, os coeficientes da Equação 17 foram avaliados para a definição do melhor passo. Nesse contexto, sugere-se o deslocamento de 10 MPa e 8°C a partir de um ensaio inicial em 39 MPa e 98 °C, até se encontrar um ponto de decaimento da resistência à compressão diametral. Ao observar a diminuição da resistência, deve-se realizar o planejamento composto de dois níveis, com repetições no ponto central, para avaliar a temperatura e pressão no ponto ótimo global.

## 6 CONCLUSÕES

Conclui-se que, a biomassa de bagaço de malte apresentou características vantajosas para o uso energético como poder calorífico superior, teores de extrativos, umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

O poder calorífico médio do bagaço de malte é  $19,9 \pm 0,5$  MJ/kg; valor superior ao da madeira de bambu, casca de coco de babaçu, bagaço de cana seco, madeira da espécie Pinho, casca de amêndoas, casca de sementes de girassol e caroço de azeitona. Sua densidade energética antes da compactação era  $7,91$  GJ/m<sup>3</sup> (partículas menores) e  $7,14$  GJ/m<sup>3</sup> (partículas maiores). Após a compactação a densidade energética atingiu o valor de  $24,32$  GJ/m<sup>3</sup>.

Conclui-se, também, que as condições de temperatura, pressão e granulometria utilizadas para fabricar os briquetes foram adequadas pois todos tinham boa aparência, não descamavam e estavam aparentemente bem compactados. Além disso, a densidade aparente dos briquetes, no valor de  $1,22 \pm 0,03$  g/cm<sup>3</sup>, é expressivamente maior que a densidade *bulk* da biomassa. Isso também se reflete na densidade energética, que nos briquetes é cerca de 3 vezes maior.

No intervalo onde os experimentos de compactação foram realizados, foi determinado um máximo local (resistência de  $1,64$  MPa) onde a temperatura é  $100$  °C, a pressão  $39$  MPa e a granulometria é do tipo A, mais fina. A fim de encontrar um ponto ótimo global, sugere-se que sejam realizados experimentos futuros, inicialmente em  $39$  MPa e  $98$  °C, e posteriormente, deslocados em  $10$  MPa e  $8$  °C até que o resultado da resistência dos briquetes apresente um decaimento. Nesse ponto, o modelo de ajuste dos dados pode apresentar um ponto de ótimo global.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2003b. Publicada com Emenda nº 1/2003.

BARTH-HAAS GROUP. **THE BARTHHAAS REPORT 2021/22**. Nuremberg: BarthHaas GmbH & Co. KG, 2022. 39 p.

BRASIL, Augusto César de Mendonça *et al.* **Caracterização e aplicação de biomassa em tecnologias de conversão termoquímica**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2021. *E-book*

BORÉL, Lidja Dahiane Menezes Santos. **Estudo de aplicação da pirólise rápida em leito de jorro para valorização de resíduos agroindustriais**. 2018. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2014. 736 p. *E-book*.

DE LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. APARECIDO. **Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 3p. (Comunicado Técnico, 220).

DE OLIVEIRA, Paulo Renato Souza; TRUGILHO, Paulo Fernando; DE OLIVEIRA, Tiago José Pires. Briquettes of acai seeds: characterization of the biomass and influence of the parameters of production temperature and pressure in the physical-mechanical and energy quality. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-10, 2022.

DE RAMOS E PAULA, Luana Elis *et al.* Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa florestal brasileira**, v. 31, n. 66, p. 103-103, 2011.

DEMIRBAS, A. **Calculation of higher heating values of fatty acids**. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v. 76, n. 5, p. 431–434, 1997.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in energy and combustion science**. Turquia: Elsevier, v. 30, p. 219-230, 2004.

DIAS, J. M. C. de S. *et al.* Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. 2012.

DINIZ, J. **Conversão Térmica de Casca de Arroz à baixa temperatura: Produção de Bioóleo e Resíduo Sílico Carbonoso Adsorvente**. Tese Doutorado (doutorado em química) PPGQ, UFSM, Santa Maria: 2005.

FIEBIG, Matheus. **POTENCIAL CAPACIDADE ENERGÉTICA DO BAGAÇO DE MALTE PARA CALDEIRAS DE PEQUENO PORTE**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2022

FRANCISKI, Mauro A. *et al.* Development of CO<sub>2</sub> activated biochar from solid wastes of a beer industry and its application for methylene blue adsorption. **Waste Management**, v. 78, p. 630-638, 2018.

GUEDES, Carmen Luisa Barbosa *et al.* Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. **Química Nova**, v. 33, p. 781-786, 2010.

HAMMERTON, J. *et al.* Characterisation of biomass resources in Nepal and assessment of potential for increased charcoal production. **Journal of environmental management**, v. 223, p. 358-370, 2018.

HANSTED, Ana Larissa 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.

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

KALIYAN, Nalladurai; MOREY, R. Vance. Densification characteristics of corn cobs. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 5, p. 559-565, 2010a.

KALIYAN, Nalladurai; MOREY, R. Vance. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

KALIYAN, Nalladurai; MOREY, R. Vance. 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, 2010b.

KATYAL, S.; THAMBIMUTHU, K.; VALIX, M. Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on char yield and characteristics. **Renewable Energy**. Canada: Pergamon, v. 28, p. 713-725, 2003.

LIMA, G. B. G. **Utilização de Biomassa na Secagem de Produtos Agrícolas via Gaseificação com Combustão Adjacente dos Gases Produzidos**. Monografia (trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, São Paulo: 2004.

MACEDO, L. A. **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM - 189/2012, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49p. 2012.

MAGDZIARZ, Aneta *et al.* Mineral phase transformation of biomass ashes—Experimental and thermochemical calculations. **Renewable Energy**, v. 128, p. 446-459, 2018.

MAIONE, N.R. **Pré-tratamento hidrotérmico do bagaço de malte (BSG) visando a produção de etanol de segunda geração**, Tese (Mestrado), Instituto de Química, UFG, 2019.

MATHIAS, T. R. S.; MELLO, P. P. M. de; SERVULO, E. F. C. Caracterização de resíduos cervejeiros. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Santa Catarina. 2014.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. John wiley & sons, 2017.

MONTGOMERY, DOUGLAS C.; RUNGER, GEORGE C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros, 2ª. **Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC**, p. 416, 2003.

MUSSATTO, Solange I.; ROBERTO, Inês C. Chemical characterization and liberation of pentose sugars from brewer's spent grain. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology**, v. 81, n. 3, p. 268-274, 2006.

NETO, Benício Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Bookman Editora, 2010.

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

OLIVEIRA, Aylson Costa *et al.* Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 59-68, 2012.

OLIVEIRA, P. R. S. de. **Pirólise lenta de briquetes de resíduo de açaí em reator de leito fixo**. 2021. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

PALERMO, Gilmara Pires de M. *et al.* Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, v. 11, n. 1, p. 1-6, 2012.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1710-1719, 2007.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of Residues from Plant Biomass for use in Energy Generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, abr./jun. 2011.

PROTÁSIO, Thiago de Paula *et al.* Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. **Cerne**, v. 23, p. 1-10, 2017.

SALIM, R.; WAHAB, R. **Effect of oil heat treatment on chemical constituents of semantan bamboo (*Gigantochloa scortechinii*) Gamble**. *Journal of Sustainable Development*, v. 1, n. 2, p. 91-98, 2008.

SANTOS, Guilherme Henrique Fávero; DO NASCIMENTO, Raphael Santos; ALVES, Geziele Mucio. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Uningá Review**, Maringá, v. 29, n. 2, 2017.

SCHMITT, D.K. **Estudo do Potencial bioenergético do resíduo de cervejaria considerando suas propriedades físico-químicas, parâmetros bioenergéticos e comportamentos de combustão**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2021.

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

SILVA, Lazaro Benedito da *et al.* Anatomia e densidade básica da madeira de *Caesalpinia pyramidalis* Tul.(Fabaceae), espécie endêmica da caatinga do Nordeste do Brasil. **Acta botânica brasílica**, v. 23, p. 436-445, 2009.

SILVA, Loyane Fernandes da. **Viabilidade técnica da produção de briquetes a partir do bagaço de malte de cevada**. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília. 2018.

SIMÕES, Leticia Maciel Sant'Ana *et al.* Biomass to biofuel densification of coconut fibers: Kinetic triplet and thermodynamic evaluation. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-18, 2022.

SMITH, I. E. *et al.* The briquetting of wheat straw. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 22, n. 2, p. 105-111, 1977.

SOUZA, Frederico; VALE, Ailton Teixeira. 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, 2016.

STELTE, Wolfgang *et al.* Recent developments in biomass pelletization – A review. **BioResources**, v. 7, n. 3, p. 4451 – 4490, 2012.

STURION, J.A; PEREIRA, J. C. D; CHEMIM, M.S; Qualidade da Madeira de *Eucalyptus viminalis* Para Fins Energéticos Em Função Do Espaçamento e Idade de Corte. **Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo**, n. 16, p.55-59, dez. 1988.

TUMULURU, Jaya Shankar *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.

VAZ JÚNIOR, Sílvio *et al.* Biomassa para Química Verde. **Embrapa Informação Tecnológica**: Brasília, 2013.

WERTHER, J. *et al.* Combustion of agricultural residues. **Progress in energy and combustion science**. Alemanha: Pergamon, v.26, p. 1-27, 2000.

YAMAJI, Fábio Minoru *et al.* Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Energia na Agricultura**, v. 28, n. 1, p. 11-15, 2013.

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

YUNUSA S. U. *et al.* A comprehensive review on the technical aspects of biomass briquetting. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-26, 2023.