

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**ALINE LIMA DE SENA**

**EFEITO DA COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA NOS PARÂMETROS DE PROCESSO  
E NA QUALIDADE DOS PELLETS PRODUZIDOS EM PELETIZADORA DE  
MATRIZ PLANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientadora: Dra. Martha Andreia Brand  
Coorientador(a): Alexsandro Bayestorff da Cunha

**LAGES – SC**

**2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

DE SENA, ALINE  
EFEITO DA COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA NOS  
PARÂMETROS DE PROCESSO E NA QUALIDADE DOS  
PELLETS PRODUZIDOS EM PELETIZADORA DE MATRIZ  
PLANA / ALINE DE SENA. -- 2021.  
78 p.

Orientadora: Martha Andreia Brand  
Coorientador: Alexsandro Bayestorff da Cunha  
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação , Lages, 2021.

1. Eucalyptus benthamii Maiden et Cambage. 2. Pinus taeda L.  
3. Misturas de biomassa. 4. ISO 17225-2. I. Andreia Brand, Martha .  
II. Bayestorff da Cunha, Alexsandro . III. Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação . IV. Título.

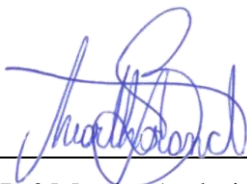
**ALINE LIMA DE SENA**

**EFEITO DA COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA NOS PARÂMETROS DE  
PROCESSO E NA QUALIDADE DOS PELLETS PRODUZIDOS EM  
PELETIZADORA DE MATRIZ PLANA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

**Banca examinadora**

**Orientadora:**

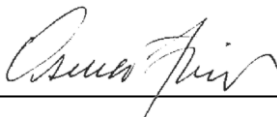


---

Prof. Drª. Martha Andreia Brand

Universidade do Estado de Santa Catarina

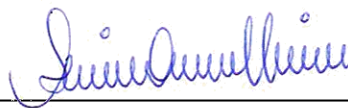
**Membros:**



---

Dr. Osmar José Romeiro de Aguiar

Universidade do Estado do Pará



---

Dra. Sabrina Andrade Martins

Solumad LTDA

**Lages, 22/02/2021**

Com muito amor e carinho, dedico este  
trabalho, aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a força e dedicação para alcançar mais essa vitória, eu sei que jamais seria possível sem a ajuda dele. Agradeço aos meus pais, Nazaré e Waldiney, que batalharam tanto para me dar o suporte necessário para chegar aqui. A minha mãezinha que sempre esteve do meu lado, ela é meu porto seguro e minha inspiração, a mulher que eu mais admiro na vida, e a qual me espelho. Obrigada por tudo e por tanto, você é a minha vida. Ao meu pai que mesmo longe está guiando meus passos, sinto sua falta até hoje meu amor. Amo vocês mais que qualquer coisa nesse mundo.

Agradeço a minha tia e mãe Luciana Lima, que me acolheu como sua filha todos esses anos. Ao meu irmão André Luis e ao meu primo Pedro Lucas o qual eu amo incondicionalmente e que sempre torcem por mim. A minha bisavó Romualda, a minha avó Maria Silva e meu avô Vilmar por sempre acreditarem no meu potencial. Aos meus tios, tias, primos, primas e amigos, por todo amor, carinho e apoio. Amo vocês.

Agradeço a minha amiga Betel e seu marido Adam, por todo apoio e ajuda nesse tempo longe da minha família, vocês foram a minha família em Lages.

À minha orientadora Martha, por aceitar me orientar, obrigada pela oportunidade e por todos os ensinamentos, sem sombra de dúvida foi a melhor orientadora que eu poderia ter tido. Obrigada pela paciência e dedicação.

Agradeço ao professor Alexssandro e a professora Pollyana por sempre se mostrarem disponíveis para me auxiliar quando precisei.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina, pela oportunidade de um estudo público e de qualidade.

Agradeço a mim, por nunca ter desistido, por sempre batalhar e alcançar o que quero com muita dedicação e esforço. Eu me amo e também mereço me dar os parabéns.

## RESUMO

A geração de resíduos é uma característica intrínseca da cadeia produtiva florestal, constituindo-se em um grande passivo ambiental. Dentro do contexto atual, em face das perspectivas de esgotamento das fontes de combustíveis fósseis, torna-se de fundamental importância o desenvolvimento de alternativas energéticas que atendam tanto ao suprimento de energia quanto ao desenvolvimento sustentável. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da composição da biomassa de *Pinus* e maravalhas de *Eucalyptus benthamii* nas propriedades físicas e energéticas das misturas antes da peletização; (b) nos parâmetros de peletização em matriz plana e (c) na qualidade dos pellets produzidos a partir destas misturas. A matéria-prima utilizada para a produção dos compactados foi caracterizada quanto as propriedades físicas (teor de umidade, densidade a granel, distribuição de granulometria) e energéticas (poder calorífero superior e líquido, análise imediata e densidade energética). Para a comparação dos parâmetros foram realizados o total de 5 tratamentos, que consistiram de pellets produzidos com: 100% de maravalha de *P. taeda* (P100); com 75% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 25% do peso da mistura de partículas de *E. benthamii* (P75E25); com 50% de maravalha de *P. taeda* e 50% de partículas de *E. benthamii* (P50E50); com 25% de maravalha de *P. taeda* e 75% de partículas de *E. benthamii* (P25E75); com 100% de partículas de *E. benthamii* (E100). O processo de peletização foi realizado em um equipamento piloto de laboratório. Durante a peletização foram avaliados os parâmetros de: pressão, potência elétrica da matriz, velocidade de alimentação da biomassa e velocidade de resfriamento dos pellets. Estes parâmetros variaram ao longo do processo em função das propriedades físicas da biomassa *in natura*. Concluiu-se que a mistura de biomassa contendo *Pinus taeda* e *Eucalyptus benthamii* promoveu alterações nas propriedades de teor de umidade requerido para a produção de pellets, a densidade a granel das partículas, a granulometria, teor de cinzas, poder calorífico superior e densidade energética total e líquida das composições de biomassa. Se tratando dos parâmetros do processo, concluiu-se que a maior adição de eucalipto nas misturas resultou na redução da velocidade de alimentação da biomassa na matriz; aumento da temperatura da matriz e aumento da pressão dos rolos de compressão. Quanto à composição química inorgânica, o óxido de cálcio e óxido de silício foram os compostos presentes em maior proporção em todas as misturas de biomassa. Todas as misturas utilizadas resultaram em pellets com altos ou severas propensões de formação de escória, incrustação, porém baixa propensão a corrosão dos sistemas de

queima e somente o tratamento P100% atingiu o valor estabelecido pela ISO 17225-2 para uso comercial e industrial (I3).

**Palavras chaves:** *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage; *Pinus taeda* L.; Misturas de biomassa; ISO 17225-2

## ABSTRACT

The generation of waste is an intrinsic characteristic of the forest productive chain, constituting a great environmental liability. Within the current context, in view of the prospect of depletion of fossil sources, it's become to be a fundamental importance the development of energy alternatives that serves both the supply of energy and sustainable development. Thus, the objective of this work was to evaluate the influence of the biomass composition of *Pinus* and *Eucalyptus benthamii* shavings (a) on the physical and energy properties of the mixtures before pelletizing; (b) the pelletization parameters in flat matrix and (c) the quality of the pellets produced from these mixtures. The raw material used for the production of compacts was characterized in terms of physical properties (moisture content, bulk density, particle size distribution) and energy (superior heat and liquid power, immediate analysis and energy density). To compare the parameters, a total of 5 treatments were performed, which consisted of pellets produced with: 100% *P. taeda* wood shavings (P100); with 75% of the weight of the *P. taeda* wood shavings mixture and 25% of the weight of the *E. benthamii* particle mixture (P75E25); with 50% *P. taeda* wood shavings and 50% *E. benthamii* particles (P50E50); with 25% *P. taeda* wood shavings and 75% *E. benthamii* particles (P25E75); with 100% *E. benthamii* particles (E100). The pelletizing process was carried out in a pilot laboratory equipment. During pelletizing, the following parameters were evaluated: pressure, electrical power of the matrix, biomass feeding speed and pellet cooling speed. These parameters varied throughout the process depending on the physical properties of the biomass in natura. It was concluded that the biomass mixture containing *Pinus taeda* and *Eucalyptus benthamii* promoted changes in the properties of moisture content required for the production of pellets, the bulk density of the particles, the granulometry, ash content, superior calorific power and total energy density and liquid content of biomass compositions. Regarding the process parameters, it was concluded that the greater addition of eucalyptus to the mixtures resulted in a reduction in the biomass feed speed in the matrix; increasing the matrix temperature and increasing the pressure of the compression rollers. As for the inorganic chemical composition, calcium oxide and silicon oxide were the compounds present in the greatest proportion in all biomass mixtures. All the mixtures used resulted in pellets with high or severe propensities for slag formation, scale, but low propensity for corrosion of the firing systems and only the P100% treatment reached the value established by ISO 17225-2 for commercial and industrial use (I3 ).

**KEYWORDS:** *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage; *Pinus taeda* L.; Biomass mixtures; ISO 17225-2.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Proporções da composição das misturas da matéria-prima de <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus benthamii</i> (%) para a composição dos tratamentos utilizados no experimento .....	29
Tabela 2 –	Análises físicas, químicas e energéticas realizadas na madeira de <i>Eucalyptus benthamii</i> e <i>Pinus taeda</i> e nas misturas utilizadas na produção dos pellets .....	30
Tabela 3 –	Análises realizadas para a determinação da qualidade dos pellets produzidos com diferentes misturas de <i>Pinus</i> e <i>Eucalyptus benthamii</i> ..	35
Tabela 4 –	Propriedades físicas das partículas e das misturas de biomassa que compõe os tratamentos antes da peletização .....	38
Tabela 5 –	Distribuição granulométrica das partículas que compõe os tratamentos antes da peletização .....	40
Tabela 6 –	Propriedades energéticas das misturas utilizadas para a peletização .....	42
Tabela 7 –	Correlação de Pearson entre as propriedades .....	43
Tabela 8 –	Variações nos parâmetros de peletização em função das diferentes misturas de biomassa para a produção dos pellets .....	45
Tabela 9 –	Correlações as propriedades físicas da biomassa e os parâmetros de peletização para diferentes misturas de <i>pinus</i> e <i>eucalipto</i> para produção de pellets .....	48
Tabela 10 –	Propriedades físicas e energéticas dos pellets contendo diferentes proporções das misturas .....	50
Tabela 11 –	Propriedades físicas dos pellets contendo diferentes proporções das misturas .....	53
Tabela 12 –	Correlações entre as propriedades dos pellets entre si .....	57
Tabela 13 –	Correlações entre as propriedades dos pellets com as propriedades das misturas in natura .....	57
Tabela 14 –	Correlações entre as propriedades dos pellets com os parâmetros de peletização .....	58
Tabela 15 –	Composição química elementar orgânica e inorgânica dos pellets com diferentes misturas de biomassa .....	58

Tabela 16 – Índices de deposição calculados com base na composição química inorgânica das diferentes misturas de biomassa .....	59
Tabela 17 – Correlações entre os índices de deposição e os elementos inorgânicos presentes nas misturas de biomassa .....	60
Tabela 18 – Etapas de degradação termogravimétrica dos pellets com diferentes misturas de biomassa .....	62
Tabela 19 – Perda de massa em cada estágio de degradação térmica (%) em cada estágio de degradação térmica dos pellets e da lignina residual .....	62
Tabela 20 – Temperaturas de maior velocidade de perda de massa e intervalo de temperatura da perda de massa dos pellets e da lignina residual .....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Secagem dos cavacos de Eucalipto ao ar livre .....	28
Figura 2 –	Secagem dos cavacos de Eucalipto em estufa elétrica (60°) .....	29
Figura 3 –	Peletizadora piloto de laboratório .....	32
Figura 4 –	Matriz plana de peletização da peletizadora de laboratório .....	32
Figura 5 –	Local de leitura dos parâmetros de peletização .....	34
Figura 6 –	Variação da velocidade da alimentação da biomassa na matriz peletizadora em função da proporção de pinus e eucalipto na mistura ..	46
Figura 7 –	Variação da temperatura da matriz peletizadora em função da proporção de <i>pinus e eucalipto</i> na mistura .....	46
Figura 8 –	Variação da pressão dos rolos sobre a matriz peletizadora em função da proporção de pinus e eucalipto na mistura .....	47
Figura 9 –	Resultado da peletização dos 5 tratamentos .....	49
Figura 10 –	Diferenças na densidade energética entre matéria-prima e pellets e entre as misturas de biomassa usadas para a produção dos pellets .....	52
Figura 11 –	Variação do comprimento (mm) dos pellets em função das misturas de biomassa .....	54
Figura 12 –	Variação do diâmetro (mm) dos pellets em função das proporções de mistura das biomassas .....	55
Figura 13 –	Variação da densidade da unidade (g/cm <sup>3</sup> ) dos pellets em função das proporções de mistura das biomassas .....	56
Figura 14 –	Degradação térmica dos pellets com diferentes misturas de biomassa. Pellets com 100% de pinus (a); pellets com 75% de pinus e 25% de eucalipto (b); pellets com 50% de pinus e 50% de eucalipto (c); pellets com 25% de pinus e 75% de eucalipto (d) e pellets com 100% de eucalipto (e) .....	61

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	Objetivo geral .....	13
1.1.2	Objetivos específicos .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
2.1	<i>PELLETS</i> COMO RECURSOS ENERGÉTICOS .....	14
2.2	MATÉRIA-PRIMA UTILIZADAS PARA O PROCESSO DE PELETIZAÇÃO .....	15
2.3	PROCESSO DE PELETIZAÇÃO DA BIOMASSA .....	15
2.4	VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DOS PELLETS ...	17
2.4.1	Variáveis relacionadas a matéria-prima .....	17
2.4.2	Variáveis relacionadas ao processo .....	24
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
3.1	MATÉRIA-PRIMA .....	28
3.2	PREPARO DO MATERIAL .....	28
3.3	ANÁLISE FÍSICA E ENERGÉTICA DA MATÉRIA-PRIMA .....	29
3.4	PELETIZAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DOS PELLETS .....	31
3.5	MAPEAMENTO DOS PROBLEMAS ASSOCIADOS À GERAÇÃO E TRATAMENTO DAS CINZAS NA COMBUSTÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....	36
3.6	PLANO EXPERIMENTAL .....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MATÉRIA-PRIMA ...	38
4.2	INFLUÊNCIA DAS MISTURAS DE MATÉRIAS-PRIMAS NOS PARÂMETROS DE PELETIZAÇÃO EM PELETIZADORA DE MATRIZ PLANA .....	44
4.3	INFLUÊNCIA DAS MISTURAS DE BIOMASSA E DOS PARÂMETROS DE PELETIZAÇÃO NA QUALIDADE DOS PELLETS .	48
4.4	MAPEAMENTO DOS PROBLEMAS ASSOCIADOS À GERAÇÃO E TRATAMENTO DAS CINZAS NA COMBUSTÃO DA BIOMASSA .....	58
4.5	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS PELLETS .....	60

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente preocupação mundial de aumentar o uso de energia de fontes renováveis, os resíduos das mais variadas origens despontam como interessantes alternativas energéticas (PROTÁSIO *et al.*, 2011). Segundo Iwakiri (2000) uma parte substancial de resíduos provenientes do processamento mecânico da madeira é utilizada para geração de energia para fins industriais e domésticos.

Os resíduos industriais apresentam maior potencialidade para uso imediato, devido ao fato de estarem concentrados em áreas junto às indústrias, podendo ser coletados com facilidade, tornando-se assim uma importante e econômica fonte de matéria-prima para produção de combustível (MIGLIORINI, 1980).

No entanto, o uso da biomassa *in natura* pode dificultar a produção de energia, pois na grande maioria dos casos, sua densidade é baixa e o teor de umidade é elevado. Assim, a compactação do material, formando pellets, aumenta sua densidade, resistência mecânica, poder calorífico e valor comercial (FERNANDEZ *et al.*, 2017). O processo de pelletização de biomassa consiste na compactação da matéria prima em uma matriz de pelletização através de alta pressão aplicada, obtendo como resultado os pellets, com diâmetros finais variando de 6 mm à 12 mm e comprimento variável (STAHL e BERGHEL, 2011).

A peletização é regulada principalmente por parâmetros do processo, que incluem teor de umidade, tamanho de partícula, presença de aglutinantes e outros parâmetros da máquina, como diferença de pressão, temperatura, diâmetro da matriz, comprimento do canal de compactação, velocidade da matriz, etc (RELOVAA *et al.*, 2009).

A indústria de pellets no Brasil é recente. Em 2004, somente duas indústrias produziam estes compactados no Brasil. Em 2017, o número de indústrias já era de 18, sendo que 69% delas foram instaladas após 2012 (GARCIA *et al.*, 2017, 2018b). Em 2017, a produção nacional chegou a 470.000 toneladas sendo que 53,11% foram produzidos com madeira de *Pinus* e 45,75% de acácia negra (GARCIA *et al.*, 2018b).

Segundo Brun *et al.* (2018) o uso da madeira para geração de energia não é restritivo, ou seja, não há espécies que não possam ser utilizadas. Entretanto, algumas características intrínsecas, como a massa específica, podem indicar espécies mais adequadas para esta finalidade.

Atualmente, a espécie mais utilizada para produção de pellets é o *Pinus*. Dentro desse contexto, diante da demanda crescente pela madeira de *pinus* surge a necessidade de utilização

de espécies alternativas de reflorestamento, tais como as inúmeras espécies de eucalipto disponíveis em grandes áreas de plantios comerciais e experimentais (IWAKIRI, 2000).

O eucalipto conquistou importante posição na indústria de papel e celulose e na produção de carvão vegetal, e cada vez mais vem recebendo tratamento científico e conquistando ganhos de qualidade e produtividade através das técnicas de melhoramento genético e manejo florestal. Junto com o *Pinus*, o *Eucalyptus* é o gênero mais utilizado neste setor e de maior abundância em termos de florestas plantada (NISGOSKI, MUÑIZ E KLOCK, 1998).

O Brasil tem 9,85 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 75,2% de eucalipto e 20,6% de pinus, como mostra o levantamento Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (Pevs) 2017, divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021) sendo que sua concentração está nas regiões Sul e Sudeste, que respondem, respectivamente, por 36,1% e 25,4% do valor da produção total, impulsionadas pelo setor de florestas plantadas

Portanto o gênero *Eucalyptus* se apresenta como uma opção potencial das mais importantes não somente por sua capacidade produtiva e adaptabilidade a diversos ambientes, mas, sobretudo, pela grande diversidade de espécies, tornando possível atender aos requisitos tecnológicos dos mais diversos segmentos da produção industrial madeireira. (LOBÃO, 2004)

Nesse sentido, a boa qualidade dos resíduos utilizados como matéria-prima no processo de compactação é essencial para que o produto final seja adequado e aceito no mercado. Logo, a fim de alcançar uma produção de qualidade e aproveitando resíduos de espécies que são muito utilizadas industrialmente, os pellets devem ser produzidos a partir de diferentes biomassas residuais das cadeias produtivas florestal, tais como eucalipto e pinus a fim de ampliar a base de matérias-primas para produção de pellets.

Como os resíduos de *Pinus* conferem aos pellets produzidos com esta matéria-prima propriedades físicas, mecânicas e energéticas que atendem aos parâmetros de qualidade internacional exigidos pelos mais importantes importadores e consumidores mundiais, os estudos devem levar em consideração a madeira de *Pinus* como parâmetro de comparação de qualidade com a biomassa de *Eucalyptus benthammii* utilizada.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Estabelecer a influência da composição da biomassa nos parâmetros de processo em peletizadora de matriz plana e na qualidade de pellets para uso energético.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar as propriedades físicas e energéticas de diferentes misturas de madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage e *Pinus taeda* L. para a produção de pellets para geração de energia;
- Estabelecer a influência das variáveis do processo e de matéria prima nos parâmetros de peletização em peletizadora de matriz plana;
- Determinar a qualidade dos pellets obtidos a partir de diferentes misturas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage e *Pinus taeda* L.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 PELLETS COMO RECURSO ENERGÉTICO

Os principais problemas da utilização de resíduos industriais e florestais para produção de energia estão relacionados, principalmente, a baixa densidade energética, as dimensões, volumes variados, a alta higroscopicidade e teor de umidade (SANTOS *et al.*, 2013). No entanto, se os resíduos são encarados como matéria-prima alternativa, eles deixam de ser um problema e passam a ser um subproduto de uma empresa em questão, podendo até gerar lucro (LIMA E SILVA, 2005).

Uma das formas de solucionar os problemas e melhorar as propriedades dos resíduos é a densificação da biomassa, ou seja, produção de materiais sólidos de tamanho médio com alta concentração de energia denominados briquetes ou pellets (CARVALHO *et al.*, 2013).

Portanto, a compactação dos resíduos é uma maneira eficiente para concentrar a energia disponível da biomassa, pois adensa os resíduos da biomassa em uma forma definida, convertendo-a em um material de maior valor comercial. O processo de compactação é recomendado pois aumenta a densidade, diminui o teor de umidade, minimiza a grande variedade de formas e granulometria dos resíduos lignocelulósicos, corrigindo os problemas inerentes aos resíduos, como a baixa densidade, heterogeneidade, alto teor de umidade entre outros (CARASCHI e GARCIA, 2013; FERNADEZ *et al.*, 2017).

Pellets de biomassa florestal ou pellets de madeira são pequenos blocos ou esferas cilíndricas, compactadas e densas, resultantes da aglomeração de material lignocelulósico, que



são utilizadas na geração de energia na forma de calor ou eletricidade (DIAS *et al.*, 2012; GARCIA *et al.*, 2013).

Para European Biomass Industry Association, citado por Vidal e Hora (2011, p. 270) “a elevada densidade energética dos pellets permite que os sistemas de aquecimento obtenham autonomias equivalentes a sistemas com óleo de fontes de energia fóssil, de forma que 3,5 m<sup>3</sup> de pellets de madeira substituem 1m<sup>3</sup> de óleo. Se fosse utilizada a madeira em sua forma bruta, com 50% de teor de umidade, seriam necessários 7 m<sup>3</sup>”.

Além disso, a geometria regular e cilíndrica dos pellets permite ótima fluidez, facilitando a automatização de processos comerciais e industriais de queima do produto. É uma fonte de energia renovável e de fácil manuseio que ocupa pouco espaço na armazenagem (GARCIA *et al.*, 2013).

Sendo assim, o processo de transformação de resíduos em energia por meio da peletização pode ser uma vantagem para que o biocombustível sólido produzido seja altamente competitivo frente aos combustíveis não renováveis que atualmente têm maior participação no setor industrial. (PROTÁSIO *et al.*, 2015).

## 2.2 MATÉRIA-PRIMA UTILIZADAS PARA O PROCESSO DE PELETIZAÇÃO

Os pellets podem ser produzidos a partir de todo o tipo de biomassa na forma de pequenas partículas e baixa umidade. A biomassa de origem florestal, nas formas de serragem ou pequenos cavacos originários de florestas plantadas é a mais largamente usada no Brasil e no mundo. Toda indústria de base florestal tem esses tipos de rejeitos, elegíveis para a produção de briquetes ou de pellets (DIAS *et al.*, 2012).

Os resíduos lignocelulósicos, além de apresentarem uma relevante capacidade calorífica, são fonte energética potencialmente capaz de substituir algumas formas de combustíveis fósseis, o que pode tornar essa atividade vantajosa (SILVA, 2001). A princípio, qualquer biomassa vegetal pode ser utilizada na produção de compactados (briquetes e pellets). Atualmente, os materiais mais utilizados são os resíduos agrícolas, florestais e de processos industriais (YAMAJI *et al.*, 2013).

Dentre as biomassas agrícolas podem ser incluídos as culturas agrícolas energéticas (plantios agrícolas energéticos de curta rotação, plantios de cana de açúcar), resíduos agrícolas e sub-produtos da indústria (palhas e resíduos da agroindústria) (BRAND, 2010; NILSSON *et al.*, 2011).

Dentre as fontes renováveis de energia, insere-se o grupo das biomassas lignocelulósicas, onde se destaca a biomassa florestal. Este recurso pode ser diferenciado em

três grandes e principais grupos: o material advindo da colheita florestal (galhos, tocos, folhas e raízes), os resíduos gerados no processamento da madeira (serragem, aparas e cepilhos) e a madeira oriunda de florestas energéticas (SOUZA, 2010), além de florestas plantadas de uso múltiplo (BRAND, 2010).

Em suma, a densificação pode ser feita com toras de madeira, mas é mais amplamente utilizada com resíduos industriais. Se feito com toras de madeira, o processo produtivo torna-se mais complexo, pela adição de descasque, corte e secagem. Resíduos requerem menos preparação, pois são menores, livres de casca e, geralmente, estão mais secos para a produção (VIDAL e HORA, 2011).

## 2.3 PROCESSO DE PELLETIZAÇÃO DA BIOMASSA

Basicamente, o processo de densificação de biomassa consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas com ou sem a adição de ligantes ou tratamento térmico. No caso de densificação de biomassa de madeira, muitas vezes não é necessária a adição de ligantes, pela presença da lignina. No entanto, isso depende do teor de lignina do mix de madeira utilizado na produção (VIDAL e HORA, 2011).

Entre os processos mais comuns de densificação, estão a briquetagem e a peletização. Embora o poder calorífico, a umidade e as características químicas sejam muito semelhantes entre os dois produtos, a densidade é maior nos pellets. Por causa de suas dimensões reduzidas (cerca de 6 mm x 25 mm, em comparação com 80 mm x 90 mm dos briquetes), os pellets podem ser operados em sistemas automatizados, o que constitui importante vantagem (VIDAL e HORA, 2011).

A pelletização foi desenvolvida para a indústria de rações, a fim de reduzir o volume dos produtos e diminuir o teor de umidade do material. Esse processo consiste em secagem, refinamento, compactação, resfriamento e embalagem (SÁ, 2009).

Desta forma, o processo de pelletização de biomassa consiste na compactação da matéria prima em uma matriz de pelletização através de alta pressão aplicada, obtendo como resultado os pellets, com diâmetros finais variando de 6 mm à 12 mm e comprimento variável (STAHL e BERGHEL, 2011). Existem dois tipos de equipamentos para produção de pellets, peletização com matriz de disco e peletização com matriz de anel. Normalmente, os pellets têm diâmetro variando entre 5 e 15 mm, 30 mm de comprimento e densidade da unidade variando entre 1.000 e 1.300 kg m<sup>-3</sup> (COUTO *et al.*, 2004).

Antes de ser submetida ao processo de pelletização, em muitos casos, a matéria prima deve ser preparada através do processo de secagem e moagem. Quando a secagem é necessária, a matéria-prima passa por um secador que pode ser do tipo ciclônico ou rotativo. Na secagem, o contato da biomassa com o ar em altas temperaturas retira água do material, resultando em uma umidade menor e apropriada para o processo de pelletização (CORRÊA, 2003). Outro processo que em muitos casos se faz necessário e usado na preparação da biomassa antes da pelletização é o processo de moagem. Neste processo a matéria prima passa pelo moinho para diminuir o tamanho médio das partículas (OBERNBERGER e THEK, 2004; LEHMANN *et al.*, 2012)

Dessa forma, o processo geral de pelletização entre os diferentes tipos de matérias primas de biomassa é similar, podendo haver peculiaridades entre os diferentes parâmetros de processos no que se diz respeito à umidade ideal para pelletização, granulometria adequada, diâmetro da matriz de pelletização, pressão de pelletização, produção alcançada por hora, qualidade dos pellets, poder calorífico resultante final, energia total gasta na transformação (COUTO *et al.*, 2004).

## 2.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DOS PELLETS

### 2.4.1 Variáveis relacionadas a matéria-prima

#### ➤ Propriedades físicas

##### Teor de umidade

Souza *et al.*, (2011) afirmaram que o teor de umidade pode ser considerado uma das características mais relevantes ao se utilizar materiais lignocelulósicos para a geração de energia, tanto em processos termoquímicos, como a combustão e a pirólise, quanto em processos físicos, como a densificação para produção de pellets e briquetes, e biológicos, como a fermentação.

O teor de umidade influencia na formação dos pellets devido ao processo de transferência de calor com consequente plasticização da lignina, e também por reduzir as propriedades energéticas do combustível (TUMURULU *et al.*, 2011).

Almeida (2015) afirmou que na pelletização um fator muito importante é o controle da umidade da matéria prima. Caso a umidade dos pellets seja muito baixa este sofrerá com o acúmulo de calor gerado no momento de passagem do material pela matriz de pelletização, podendo haver queima na sua superfície. O autor ainda afirmou que nos casos de umidade alta

haverá uma redução nas propriedades mecânicas como durabilidade e dureza em função da pressão de vapor dentro dos orifícios da matriz, aumentando a quantidade de pellets quebradiços e poeira.

Dessa forma, o teor de umidade pode influenciar a densificação de três maneiras: pela redução da temperatura de transição vítrea, impedindo o amolecimento e adesão entre as partículas; pela formação de uma camada sólida, devido às partículas não penetrarem na matriz de peletização; e aumento da área de contato entre as partículas por forças de Van der Waal's (TUMURULU, 2014).

Carone *et al.* (2011) afirma que o aumento do teor de umidade da biomassa aumenta a mobilidade molecular dos polímeros amorfos (lignina e hemiceluloses) e outros extrativos com baixa transição vítrea, reduzindo assim atrito estático que por sua vez afeta a qualidade do pellet e o consumo de energia durante a peletização. A umidade facilita a gelatinização do amido, a desnaturação de proteínas e as fibras do processo de solubilização durante a peletização (CARONE *et al.*, 2011) e atua como aglutinante aumentando a ligação pelas forças de van der Waals (TUMURULU, 2011).

Segundo Carvalho *et al.* (2013), a umidade da biomassa para peletização deve estar entre 8 e 15%. Pellets produzidos com biomassas com alto teor de umidade apresentam, de modo geral, baixa resistência mecânica em decorrência de fissuras em função da saída dos gases, principalmente vapor de água. Em consequência disso, reduzindo sua resistência e favorecendo a geração de finos durante seu manuseio. Pellets com baixo teor de umidade, tendem a se tornar frágeis em poucos dias devido à umidade de adsorção do meio ambiente (LI *et al.*, 2012).

Jacinto *et al.*, (2017) constatou que o teor de umidade para matérias-primas com aproximadamente 42% de lignina pode chegar a 23% para que a peletização produza pellets com qualidade internacional. Já Brand *et al.*, (2018) precisou umedecer a biomassa de grimpã de araucária, com 42% de teor de lignina, até 20% de teor de umidade para a obtenção de pellets com qualidade.

O baixo teor de umidade dificulta a compactação da biomassa visto que a madeira apresenta baixa condutividade térmica. Logo, a presença de água colabora com o processo de transferência de calor, aumento da temperatura das partículas e consequentemente a plasticização da lignina, que por sua vez atua como um aglutinante natural da biomassa (SIQUEIRA, 2017).

Em síntese, o teor de umidade é um parâmetro importante porque afeta diretamente no balanço energético da densificação, pois quanto menor o teor de umidade, maior será a produção de calor por unidade de massa (VALE *et al.*, 2000). Além disso, pellets com elevado

teor de umidade apresentam menor poder calorífico e baixa resistência mecânica, devido a influência da molécula de água entre as partículas. Logo, a quantidade de umidade na biomassa tem uma influência direta no poder calorífico útil, na eficiência e na temperatura da combustão (LETHIKANGAS, 2001).

### Densidade a granel

Entre as propriedades físicas, a densidade a granel representa a quantidade em massa de pellets contida em um recipiente de volume conhecido (DIN EN 15103, 2010). Dessa forma, pellets com maior densidade a granel são preferíveis por permitirem o transporte e armazenamento de maior quantidade de massa.

A densidade aparente também deve ser considerada na avaliação da biomassa para a produção de bioenergia, pois maiores densidades indicam mais massa disponível para um mesmo volume considerado e maior densidade energética (BRAND, 2010). No entanto, é desejável que a biomassa lignocelulósica apresente maiores valores de densidade a granel, pois fatores como os custos com transporte e a densidade energética são essenciais na viabilidade econômica das energias renováveis (PROTÁSIO *et al.*, 2011)

A densidade a granel é muito importante para quantificar volumes de produtos com formas irregulares, pois fornece informações que poderão ser úteis para a logística e transportes dos mesmos, já que considera os espaços vazios entre uma partícula e fornece dados reais dos volumes para o transporte. Além disso, é utilizada para o cálculo da densidade energética (GARCIA, 2010). De acordo com Hahn (2004) densidade a granel é um parâmetro que se relaciona com manuseio e estocagem, transporte e plano logístico.

Se tratando desta propriedade, no processo de peletização, a densificação aumenta o volume da biomassa a partir de uma densidade aparente inicial de 40–200 kg m<sup>-3</sup> a uma densidade aparente final de 800 kg m<sup>-3</sup> (HOLLEY, 1983). Assim, a densificação da biomassa visa reduzir os custos de transporte, manuseio e armazenamento.

Kaliyan e Morey (2009) afirmam que os fatores que aumentam a resistência e a durabilidade da matéria prima compactada, também aumentam a densidade e o consumo específico de energia. No entanto, tais características não indicam necessariamente uma boa resistência ou durabilidade do produto compactado. Logo, segundo Temmerman *et al.*, (2006), não há relação entre a densidade e a durabilidade dos pellets e briquetes de biomassa.

### Granulometria

De acordo com Sánchez (2010), a granulometria fornece as frações de peso em cada dimensão característica que compõem a biomassa, sendo importante para o dimensionamento do alimentador de queimadores. É notável que com partículas de tamanho menor se obtém um processo de pelletização mais estável e com melhor qualidade final de pellets. Sendo assim, uma moagem da matéria prima se faz em muitos casos necessária, podendo variar a potência e o consumo de energia do processo moedor em função do tamanho das partículas iniciais e final desejada (GIL *et al.*, 2012).

As diferenças na granulometria da biomassa após a trituração devem-se provavelmente às características iniciais (naturais/estruturais) dos resíduos. Provavelmente, aqueles que apresentaram menor resistência à trituração produziram frações com menores granulometrias, o que poderá influenciar a densidade aparente da biomassa e dos compactados produzidos (PROTÁSIO *et al.*, 2011).

Segundo Kaliyan e Morey (2009), o tamanho das partículas é um influenciador importante da durabilidade e resistência, evidenciando a importância da classificação granulométrica da biomassa antes da compactação. O tamanho inicial das partículas influencia também a densidade final dos compactados. Matéria-prima de baixa dimensão de partículas resulta em compactados mais densos, mas requer pressões e temperaturas muito elevadas para aglomerar as partículas sem adição de ligantes (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

Portanto, o ajuste do tamanho das partículas pode ser uma solução para melhorar a compactação da biomassa vegetal. Moraes (2007) diz que diferentes granulometrias da serragem facilitam o adensamento, assim como partículas de 6 mm / 8 mm ou maiores proporcionam bons resultados.

O tamanho das partículas é um importante influenciador da durabilidade do pellet, pois quanto mais fina a granulometria, maior a durabilidade. Partículas finas adquirem mais umidade do que partículas grandes e devido a serem menores possuem maior contato superficial durante a peletização (KALIYANE e MOREY, 2009). Além disso, partículas grandes são pontos de fissura que causam fraturas e rachaduras nos pellets (MACBAIN, 1966).

Logo, o tamanho de partícula recomendado para uma boa qualidade do pellet é de 0,6-0,8 mm (TURNER, 1995). Franke e Rey (2006) recomendaram um tamanho de partícula de 0,5-0,7 mm para produzir pellets. Eles também mencionaram que tamanhos de partículas maiores que 1,0 mm atuam como pontos de ruptura pré-determinados no granulado. Outros tamanhos resultariam em maior consumo de energia durante a peletização (THEK e OBERNBERGER, 2010).

Kaliyan e Morey (2009) verificaram que quanto menor o tamanho da partícula melhor será a compactação. Partículas com dimensões pequenas são interessantes pelo fato de abranger uma área maior de superfície e conseqüentemente, promovendo, uma melhor interação.

Partículas muito pequenas podem causar atolamentos nos moinhos da peletizadora e afetar a capacidade de produção. Portanto uma mistura com diferentes tamanhos de partículas resultaria em pellets de melhor qualidade, tendo em vista que a mistura fará a ligação entre as partículas deixando pouco ou nenhum espaço entre elas (STELTE *et al.*, 2011).

Portanto, o ajuste do tamanho das partículas pode ser uma solução para melhorar a compactação da biomassa vegetal. Morais (2007) diz que diferentes granulometrias da serragem facilitam o adensamento, assim como partículas de 6 mm / 8 mm ou maiores proporcionam bons resultados.

### ➤ **Propriedades químicas**

#### Análise estrutural (teor de extrativos, teor de lignina, teor de holocelulose)

Em termos químicos, a madeira seca é definida como um biopolímero tridimensional composto de uma rede de celulose, hemicelulose e lignina, com menores quantidades de extrativos e substâncias inorgânicas (ROWELL *et al.*, 2005).

A celulose é a base estrutural das células das plantas, sendo a mais importante substância natural produzida por organismos vivos, com o teor variando em função da origem da planta. As hemiceluloses diferem da celulose por serem compostas de várias unidades de açúcar, por possuírem cadeias moleculares muito mais curtas e pelas ramificações das cadeias de moléculas (FENGEL e WEGENER, 1989). Já a lignina é um polímero aromático, amorfo, altamente complexo, constituído de unidades de fenil-propano. Os precursores da biosíntese da lignina são álcool-p-cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico (ROWELL *et al.*, 2005).

A análise estrutural da matéria-prima influencia na produção dos compactados tendo em vista que a compactação do material é garantida pela lignina que está contida na própria madeira e permite a produção do pellet sem o uso de colas ou ligantes (DÜCK, 2013). A lignina atua como um agente de ligação *in situ* no material. Em temperaturas elevadas, a lignina amolece e ajuda o processo de ligação (KALIYAN E MOREY, 2009).

Segundo Castellano *et al* (2015) biomassa com teor de lignina mais alto e baixo conteúdo de extrativo possuem maior durabilidade. Os extrativos formam uma camada fraca

que impede a ligação das partículas durante a peletização. Já a lignina favorece a aglomeração de partículas de biomassa devido ao seu comportamento termoplástico. Quando a biomassa é aquecida acima da temperatura de transição vítrea, a lignina fica macia e exibe propriedades termoendurecíveis (THEERARATTANANOON *et al.*, 2011).

A aglomeração dos materiais lignocelulósicos para formar pellets ocorre devido a diferentes mecanismos de ligação entre partículas, que se dão pelo amolecimento dos componentes da biomassa em condições de alta pressão e temperatura (CASTELLANO *et al.*, 2015). Back (1987) estudou que nessas condições, as ligações de hidrogênio entre hemicelulose e celulose amorfa desempenham um papel principal nos processos de ligação entre fibras. De acordo com seu trabalho, ligações covalentes ocorrem entre fibras, sendo a lignina o polímero de madeira mais reativo nestas reações.

Santos (2008) ao analisar a influência da composição química (holocelulose, lignina e extrativos) na densidade básica, na contração da madeira, nos rendimentos e densidade aparente do carvão vegetal, concluiu que os atributos químicos têm grande influência nas propriedades da madeira, verificou uma correlação positiva e significativa, entre a lignina com a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal e da holocelulose com a densidade básica da madeira. Trugilho *et al.* (1996) encontrou correlação positiva e significativa entre a densidade básica de madeira de eucalipto e teor de holocelulose, sugerindo que madeiras mais densas possuam menores teores de lignina.

De acordo com Bergman *et al.* (2005), o rendimento do processo de produção de energia também pode variar em função de diferenças no conteúdo de extrativos e lipídeos entre diferentes biomassas, tendo em vista que os mesmos são expulsos da biomassa por evaporação e conseqüentemente alteram o rendimento do processo.

Portanto para a utilização energética da biomassa florestal, é importante levar em consideração as características químicas do material, pois elas podem influenciar fortemente no rendimento e na manutenção dos equipamentos, principalmente nos que realizam processos de combustão (SOUZA, 2011).

### ➤ **Propriedades energéticas**

#### Análise imediata

De acordo com Sánchez (2010), a análise imediata fornece as frações em peso de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo de uma amostra de biomassa. A análise química



imediate é indispensável na caracterização da biomassa, uma vez que a sua composição química influencia diretamente no processo de combustão (SANTOS *et al.*, 2011).

Os materiais voláteis são aqueles componentes presentes na madeira que podem ser removidos por efeito da temperatura em atmosfera não oxidante ou inerte (KURAUCHI, 2014). Representam a matéria volátil residual do carvão composta principalmente de hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono (SANTOS, 2010). De acordo com Cortez *et al.*, (2008), a importância dos materiais voláteis está durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa.

Segundo Obernberger e Thek (2004), o teor de materiais voláteis é alto nos combustíveis de biomassa, podendo variar entre 76 - 86% em base seca, o que acarreta em uma maior emissão de gases durante a combustão, resultando em uma queima acelerada e dificultando que altas temperaturas sejam atingidas nos fornos. Ratificado por Brito e Barrichelo (1982) que afirmam que os teores de carbono fixo da madeira, tanto de coníferas como de folhosas, variam de 15 a 25%, enquanto que os teores de voláteis situam-se entre 75 e 85%.

Já o teor de carbono fixo consiste na quantidade de carbono presente no carvão após o processo de carbonização. Está diretamente ligado com a temperatura de carbonização, sendo que o aumento da temperatura infere no aumento do teor de carbono fixo até que seja atingido o ponto máximo de conversão, quando o mesmo começa a diminuir (SOARES, 2011). Segundo Moraes (2007), o carbono fixo, no que diz respeito à biomassa como combustível, é o componente mais importante e o principal contribuinte na produção de energia durante a combustão.

O teor de cinzas refere-se ao resíduo de óxidos minerais obtidos pela combustão completa do carvão (SANTOS, 2010). Vale salientar que o mesmo também pode ser tanto da madeira em si quanto da contaminação proveniente de poeira, terra, etc (KURAUCHI, 2014). A análise do teor de cinzas é o teste inicial responsável para a análise da viabilidade econômica e o potencial uso da biomassa como combustível (CIAMPI, 1992).

Se tratando do teor de cinzas Obernberger e Thek (2004) afirmam que teores de cinza maiores que 3% reduzem as propriedades energéticas das madeiras. Esse baixo teor de cinzas verificado nas madeiras resulta em uma vantagem sobre outros resíduos lignocelulósicos quando utilizados para fins energéticos (FREITAS *et al.*, 2016).

Portanto, a análise imediata procura representar o comportamento do material combustível durante a queima, bastante relacionado com os parâmetros cinéticos da combustão e necessários para o correto dimensionamento de caldeiras e trocadores de calor (TEIXEIRA, 1973).

Considerando o processo de peletização, Spanhol *et al.* (2015) ao determinar propriedades físicas, químicas e energéticas de pellets de biomassa residual de *Pinus spp* encontraram baixos teores de cinzas, que variaram de 0,16 a 0,77%. Considerando que a norma ISO 17225-2 limita o teor de cinzas a 3% para os pellets das categorias menos restritivas em relação à qualidade. Os pellets produzidos com esta matéria-prima atenderam as especificações da norma. Os compactados apresentaram ainda, teor de materiais voláteis entre 80,44 e 82,42% e carbono fixo entre 17,37 e 19,36%.

### Poder calorífico

O poder calorífico expressa a quantidade de calor liberado na queima completa de uma unidade de massa do combustível e é influenciado por teores de extrativos e lignina (SANTOS *et al.*, 2011). Segundo Pessoa Filho (2013) é a propriedade mais importante na avaliação energética de um combustível, pois fornece a quantidade de energia bruta (PCS).

O poder calorífico divide-se em superior e inferior. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE e DOAT, 1985). O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989).

Segundo Jara (1989), o poder calorífico superior da madeira, é muito influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc). Cunha *et al.* (1989) afirmou que o poder calorífico é mais alto quanto maior o teor de lignina e extrativos, porque o mesmo contém menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e hemicelulose).

Souza *et al.* (2011) mostraram que o poder calorífico diminui com o aumento do teor de umidade, devido ao gasto de energia para o aquecimento e vaporização da água durante o processo de combustão da biomassa.

Jacinto (2017) estudou a compactação e qualidade dos pellets produzidos a partir de maravalha de pinus, galhos de poda de macieira; falhas de pinhão e grimpas de araucária. O autor constatou que com a compactação do material, o poder calorífico superior das biomassas foi adequado à utilização para a produção de energia, variando de 4526 kcal/kg a 5065 kcal/kg com média de 4758 kcal/kg. Além de verificar que não houve influência da inclusão do pinus nas variações observadas para o poder calorífico, sendo que pode-se considerar como

referencial o poder calorífico do pinus, que é a biomassa mais comumente utilizada para a produção de pellets no Brasil e no mundo.

Ao analisar o poder calorífico de madeiras da espécie eucalipto, Soares (2011) encontrou valores que variam entre 4385,0 e 4547,1 kcal/kg. O poder calorífico superior encontrado por Furtado *et al.* (2010), estudando diferentes tipos de resíduos de *Pinus* sp. para produção de briquetes, foi superior ao da serragem de eucalipto.

Nogueira, Bispo e Franco (2014) avaliaram o potencial de utilização do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* para geração de energia elétrica. Concluíram que a espécie tem um grande potencial energético, com valor de PCS médio de 3.954kcal/kg, PCI de 3.458,4 kcal/kg

## 2.4.2 Variáveis relacionadas ao processo

Em relação ao equipamento os fatores relacionados à peletizadora são pressão, velocidade dos roletes, dimensões dos canais de compressão, distância entre os roletes e a matriz de compressão (LEE *et al.*, 2013; TUMULURU, 2014).

### ➤ Pressão

É causada pela resistência ao pressionar a matéria-prima através nos canais de pressão na matriz, onde a pressão ocorre entre o rolo e a matriz, ao submeter a matéria-prima à compressão (NIELSEN *et al.*, 2020). A prensa de peletização consiste de um rolo e uma matriz. A pressão exercida entre os componentes causa uma força de fricção que aquece e força o material através de uma das perfurações da matriz.

A resistência que induz a pressão de granulação é causada pelo mecanismo de fricção interna, onde a resistência do atrito interno é causada pela quebra de ligações entre partículas na matéria-prima, o que requer energia. O atrito interno aparece quando a matéria-prima é comprimida ou posicionada para cisalhar. A fricção externa é o atrito que ocorre quando a matéria-prima é deslizada contra a superfície da matriz (NIELSEN *et al.*, 2020).

A prensagem na matriz de peletização influencia no aumento da densidade nos pellets. Para o aumento da densidade dos *pellets*, dois processos são os responsáveis. A moagem que diminui o comprimento das partículas do material e o deixa melhor agrupado por unidade de volume e, principalmente, o aumento da densidade proveniente da redução de volume (prensagem) na matriz de pelletização (STAHL e BERGHEL, 2011)

### ➤ Temperatura

A temperatura no processo de peletização depende de três parâmetros: da temperatura de entrada da matéria-prima na peletizadora; do conteúdo de umidade da matéria-prima e do atrito nos canais da prensa. A temperatura de entrada e o teor de umidade da matéria-prima são controlados pelo processo de condicionamento, enquanto que o aquecimento por atrito depende na matéria-prima, da peletizadora e parâmetros do processo (NIELSEN *et al.*, 2020). Vale ressaltar que o atrito entre a matéria-prima, os roletes e a matriz irão determinar a temperatura a ser alcançada durante a peletização.

Apesar de o aumento da temperatura de condicionamento melhorar a qualidade do pellet, a exposição a temperatura e umidade aplicada durante o condicionamento pode induzir a alterações químicas, o que pode ser prejudicial e reduzir ou anular completamente os benefícios da peletização (MORITZ e LILLY, 2010).

Vale ressaltar que a temperatura da matriz de peletização influencia a durabilidade e densidade a granel dos pellets (TUMURULU, 2011), uma vez que a lignina é um agente ligante natural da madeira, logo se faz necessária temperatura acima da transição vítrea (75- 100°C) da mesma para que possa ocorrer a ligação entre as partículas.

#### ➤ **Velocidade de alimentação**

Na peletização, a matéria-prima é continuamente distribuída na matriz interna entre cada rolo. O rolo gira e o atrito entre ele, a matriz e a matéria-prima atuam como canais de prensa. A velocidade de alimentação influencia neste processo, tendo em vista que o controle de alimentação (manual ou automático) faz o ajuste da carga da máquina respeitando a máxima corrente do motor principal (KLEIN, 2009).

O silo deve proporcionar uma descarga uniforme e sem interrupções e que os finos devem ser descarregados na rosca alimentadora antes da entrada da matéria-prima na matriz e de forma uniforme e permanente para permitir uma mistura uniforme e proporcional dos finos para não o processo de peletização em si (KLEIN, 2009).

#### ➤ **Consumo energético**

O consumo de energia na produção de pellet (incluindo todos os estágios, da recepção do insumo até a embalagem) varia entre 80 kWh/t e 150 kWh/t de eletricidade e cerca de 950 kWh de calor por tonelada de água para ser vaporizada. Portanto, a demanda exata de energia depende das condições de produção: tamanho das partículas do insumo, teor de umidade, tecnologia e escala da planta (VIDAL e HORA, 2011).

O custo operacional da operação de uma peletizadora é avaliado com base no consumo de energia e na taxa de desgaste da matriz e dos rolos que a compõem. O consumo de energia varia para diferentes tipos de matéria-prima utilizados no processo (NIELSEN *et al.*, 2020). O dimensionamento errado da taxa de compressão de uma matriz pode além de acarretar má qualidade dos pellets pode provocar um aumento dos esforços no equipamento, aumentando o gasto com energia e, consequentemente, os custos (LI *et al.*, 2012).

Além do tipo de matéria-prima, o consumo de energia na peletizadora também é afetado pelo *design* da matriz, pelos parâmetros de peletização, como a temperatura do processo, o teor de umidade e o tamanho das partículas da matéria-prima (HARUN e AFZAL, 2016). O alto consumo de energia causa o desgaste do equipamento, mais precisamente da matriz e dos rolos que nela a compõem, além de reduzir a qualidade dos pellets produzidos (TABIL e SOKHANSANJ, 1996)

O tamanho das partículas determina o consumo de energia elétrica nos equipamentos, bem como no rendimento de moagem, na estocagem e armazenamento da matéria-prima, antes do processo de peletização (ZANOTTO e BELLAYER, 1996).

Filbakk *et al.* (2011b) estudaram a influência do armazenamento da matéria prima aplicados a diferentes temperaturas de secagem no consumo de energia para peletização de madeira. Como resultado deste experimento tem-se que com maior tempo de estocagem aumenta-se a energia elétrica gasta para peletização, atribuindo a este fato a perda de componentes do material em estoque e que não houve diferença na energia elétrica gasta na peletização com a utilização de diferentes temperaturas de secagem. O consumo de energia elétrica gasto no processo diminui linearmente com o aumento de umidade, embora exista um limite de umidade para se ter uma boa qualidade de pellets.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 MATÉRIA-PRIMA

As espécies utilizadas para o estudo foram o *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage e o *Pinus taeda* L. A madeira de *Pinus taeda* L. foi utilizada na forma de maravalha sem casca, oriunda do processo industrial de produção de portas, fornecida pela empresa Madepar premium quality door, localizada na cidade de Lages-SC.

A madeira de *Eucalyptus benthamii* foi fornecida em forma de cavacos pela empresa Multiform, localizada no município de Lages-SC. Foram utilizados cavacos da espécie, produzidos a partir de 2 árvores inteiras (troncos com casca, incluindo galhos) com 12 anos de idade. Os cavacos foram coletados em 16 de setembro de 2019.

Após a coleta, o material foi acondicionado em sacos de rafia e levado para o laboratório de Tecnologia da Madeira localizado no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) no município de Lages-SC, onde foram devidamente preparados (processo de secagem e moagem) e submetidos as análises laboratoriais para realizar a caracterização do material *in natura*.

#### 3.2 PREPARO DO MATERIAL

A maravalha de *Pinus* não passou por nenhum processo de secagem ou moagem prévia para a peletização, visto que sua granulometria e teor de umidade já estavam adequados ao processo. Para os cavacos de *Eucalyptus*, a secagem foi realizada em duas etapas. Inicialmente foi realizada a secagem ao ar livre até o ponto de saturação das fibras (Figura 1). Em seguida foi realizada a secagem controlada em estufa com temperatura de 60 °C (Figura 2). A secagem do material ocorreu até que os cavacos atingissem um teor de umidade entre 15 e 20%.

Figura 1 – Secagem dos cavacos de Eucalipto ao ar livre.



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 2 – Secagem dos cavacos de eucalipto em estufa elétrica (60°).



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Após secagem, os cavacos foram acondicionados em câmara climatizada, com condições ambientais de  $22^{\circ}\text{C} \pm 2$  e  $65\% \pm 2$  de umidade relativa do ar, para posterior moagem em moinho de martelo com abertura de peneira de 10 mm para redução granulométrica e ajuste das partículas da matéria-prima para peletização.

### 3.3 ANÁLISE FÍSICA E ENERGÉTICA DA MATÉRIA-PRIMA

A matéria-prima das duas espécies foi analisada na forma *in natura*, conforme recebido, no caso das partículas de *Pinus*, e após secagem e moagem, para as partículas de *Eucalyptus*, para permitir a caracterização das propriedades de cada espécie. As propriedades também foram determinadas após a composição de cada mistura, contendo diferentes proporções das duas espécies analisadas. Foram utilizadas essas proporções de acordo com a adição de eucalipto na mistura, a fim de chegar até a proporção de 100% de *Eucalyptus benthamii*.

Estas misturas, bem como os pellets homogêneos produzidos de *E. benthamii* e *Pinus taeda*, constituíram os tratamentos utilizados nos experimentos (Tabela 1).

Tabela 1 – Proporções da composição das misturas de matéria-prima de *Pinus taeda* e *Eucalyptus benthamii* (%) para a composição dos tratamentos utilizados no experimento

Tratamento	Proporção da matéria-prima na mistura (%)	
	<i>Pinus taeda</i> L.	<i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden et Cambage
<b>P100</b>	100	0
<b>P75E25</b>	75	25
<b>P50E50</b>	50	50
<b>P25E75</b>	25	75
<b>E100</b>	0	100

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Tanto os cavacos de *E. benthamii*, quanto a maravalha de *P. taeda*, bem como as misturas entre as duas espécies foram caracterizados, antes da peletização, quanto as propriedades físicas e energéticas (Tabela 2).

Tabela 2 – Análises físicas e energéticas realizadas na madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus taeda* e nas misturas utilizadas na produção dos pellets

Propriedade	Análise	Norma	Repetição
<b>Físicas</b>	Teor de umidade	EN 14774 (CEN, 2009)	3
	Densidade a granel	EN 15103 (DIN, 2010)	5
	Distribuição de granulometria	EN 15149-1 (EN, 2010)	3
<b>Energéticas</b>	Poder calorífico superior e líquido	DIN 51900 (DIN, 2000)	3
	Análise imediata	ASTM 1762 (ASTM, 2007)	3
	Densidade energética	*	*

Nota: \* Procedimentos descritos no texto

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Para a determinação do teor de umidade antes da peletização, granulometria e a densidade a granel (densidade aparente) a maravalha de *Pinus* foi analisada como recebido da empresa, sem prévio tratamento. Os cavacos de *Eucalyptus* foram analisados após moagem em moinho de martelo, secagem e climatização em câmara climatizada.

Para as demais propriedades a maravalha e os cavacos foram triturados em moinho de facas do Tipo Willey, e a serragem peneirada, sendo que a fração usada para as análises foi a que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh.

A densidade energética total (DET) foi calculada pelo produto entre o poder calorífico superior (PCS) e a densidade a granel (DB) para cada mistura antes de peletizar. A densidade energética líquida (DEL) foi calculada pelo produto entre o poder calorífico líquido (PCL) e a densidade a granel (DB) para cada mistura antes de peletizar.

Para todas as propriedades, foram obtidas as médias e coeficiente de variação. Os dados foram submetidos à análise de variância por meio do teste de médias de Scott Knott a um nível de confiança de 95%. Foi aplicado o Coeficiente de Correlação de Pearson e Regressão linear para a obtenção do  $R^2$  e as tendências de comportamento das correlações. As correlações foram



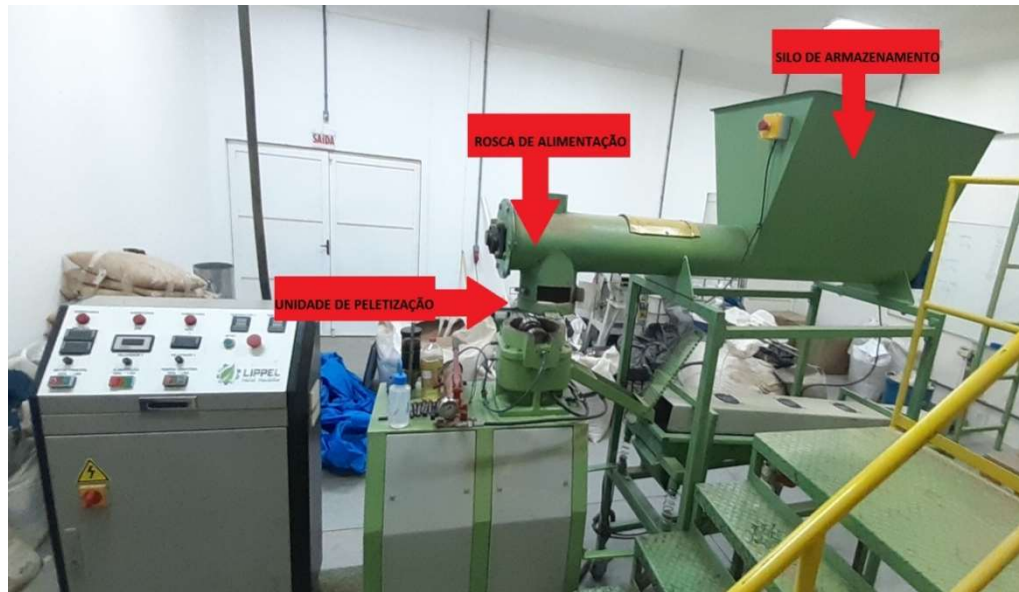
estabelecidas entre: (a) as propriedades físicas e energéticas da biomassa; (b) entre as propriedades das biomassas e suas misturas e os parâmetros de processo e (c) entre as propriedades da biomassa e as propriedades dos pellets. Os pacotes estatísticos utilizados foram o EXCEL® e o SISVAR.

### 3.4 PELLETIZAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DOS PELLETS

A peletização foi realizada em peletizadora piloto de laboratório (Figura 3), de matriz plana com as seguintes características:

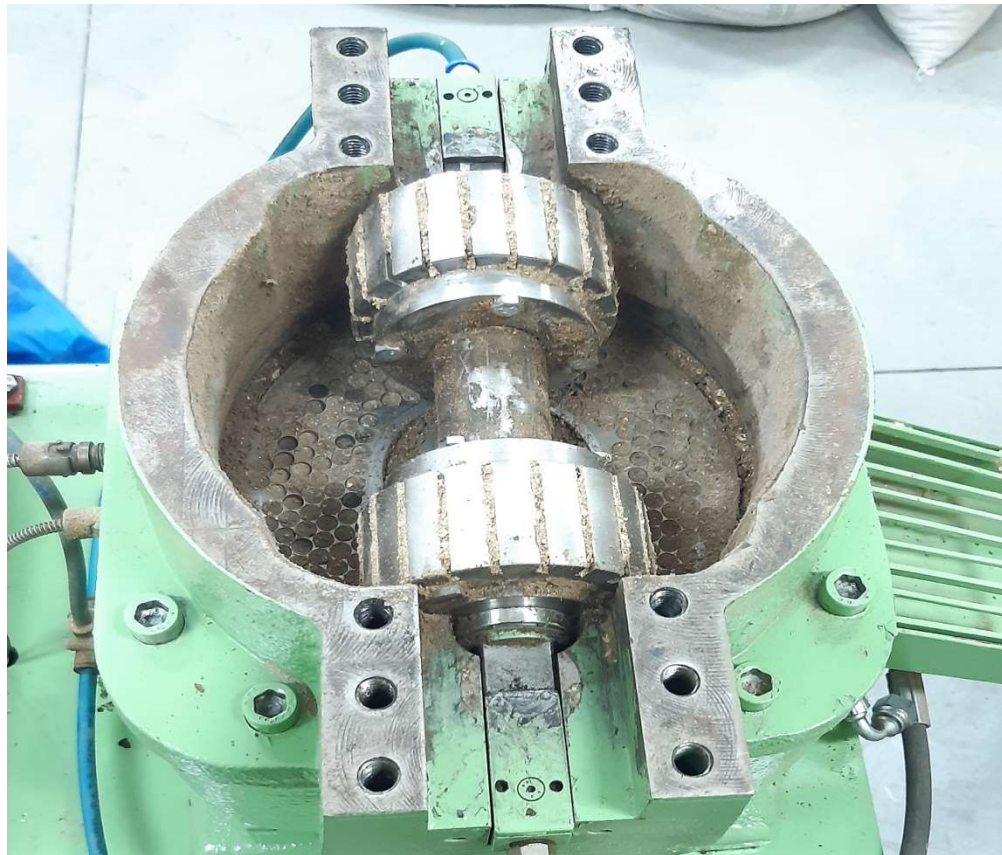
- Capacidade máxima de peletização de 400 kg/hora, com variação na produção em função da densidade do material e a taxa de alimentação;
- Variador de frequência na alimentação do motor elétrico que move a matriz de peletização, visando o ajuste da velocidade de rotação da matriz. A leitura no painel de controle é feita por meio da intensidade da corrente elétrica do motor (Ampère) e em rotações por minuto (rpm);
- Variador de frequência no motor do silo de alimentação da biomassa, permitindo controle da taxa de alimentação. A leitura no painel de controle é feita em rotações por minuto (rpm);
- Variador de frequência no motor da esteira vibratória, que permite maior ou menor tempo de resfriamento dos pellets. A leitura da frequência no painel de controle é feita em Hertz (Hz);
- Flexibilidade no uso de diferentes espessuras de matrizes até a espessura máxima de 30 mm;
- Dois conjuntos de sensores de temperatura. Um antes da entrada da biomassa na matriz peletizadora e outro na área de peletização da matriz. A leitura no painel de controle é feita em graus Celsius (°C);
- Matriz plana de peletização (Figura 4);
- Duas saídas na esteira de resfriamento. A primeira saída para pó, a segunda para pellets médios e pequenos (qualidade B) e os pellets de qualidade A são coletados no final da esteira de resfriamento.

Figura 3 – Peletizadora piloto de laboratório



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 4 – Matriz plana de peletização da peletizadora de laboratório



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Para a produção de pellet de cada tratamento, a máquina foi aquecida previamente utilizando-se maravalha de pinus para peletização. Quando a temperatura de 60°C foi atingida o processo de peletização de cada tratamento foi iniciado. Durante o processo de peletização foram acompanhados e anotados os seguintes parâmetros:

1. Velocidade da rosca de alimentação no silo de biomassa (rotações por minuto - rpm);
2. Intensidade da corrente elétrica do motor da matriz peletizadora (Ampère – A) e velocidade da matriz em rpm;
3. Pressão de compactação dos rolos compactadores sobre a matriz plana (Bar);
4. Temperatura nos sensores antes e após a matriz de compactação (°C);
5. Frequência (vibração/oscilação) da esteira de resfriamento dos pellets (Hertz – Hz).

A intensidade da corrente elétrica foi utilizada para o cálculo da potência nominal do motor (P), por meio da equação (1):

$$P = U \times I \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: P = Potência média em Watt (W)

U = Tensão em Volt (V)

I = Corrente em Ampère (A)

Em cada tratamento, os parâmetros de peletização foram sendo ajustados até a obtenção de pellets com qualidade visualmente adequada. Enquanto os pellets se desmanchavam ou quebravam, os parâmetros permaneciam sob ajuste. Os parâmetros foram medidos e anotados a cada 05 minutos durante o tempo total de peletização que variou entre 60 e 90 minutos. Esta variação foi em função das diferenças nas velocidades da alimentação, materiais e quantidade de biomassa utilizados no processo. Também foram anotados os horários de sobrecarga no motor principal (matriz), na esteira de resfriamento e esteira de aquecimento. Com base nas leituras feitas durante a peletização foram obtidos os valores médios de cada parâmetro por tratamento analisado.

Figura 5 – Local de leitura dos parâmetros de peletização



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Após a peletização, os pellets foram acondicionados em câmara climatizada com umidade relativa do ar de 65% e temperatura de 22°C. Foram armazenados em um recipiente lacrado para evitar o ganho de umidade. Posteriormente, foram realizadas as análises.

Os pellets foram analisados a partir da determinação das propriedades e enquadramento nos critérios de qualidade estipulados pela norma ISO 17225-2 (ISO, 2014), além da realização da análise termogravimétrica, análise imediata e densidade energética, não contidas na norma (Tabela 3).

Tabela 3 – Análises realizadas para a determinação da qualidade dos pellets produzidos com diferentes misturas de *Pinus* e *Eucalyptus benthamii*

	<b>Análise</b>	<b>Norma</b>	<b>Repetições</b>
<b>Análises Físicas</b>	Dimensões dos pellets	EN 16127	100 g
	Densidade a granel	NBR 6922	5
	Densidade da umidade	EN 16127	100 g
	Durabilidade*	EN 15210-1	4
	Teor de Finos*	EN 15210-2	4
	Umidade	NBR 14929	3
<b>Análises Energéticas</b>	Poder Calorífico Superior e líquido	DIN 51900	3
	Análise elementar orgânica	ASTM D5373 ASTM D4239	-
	Análise elementar inorgânica	**	-
	Análise termogravimétrica	**	-
	Densidade energética	**	-

Nota: \*\* Procedimentos descritos no texto

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

NOTA: \* Norma modificada. A peneira utilizada foi de 3,35mm e não de 3,15mm como indicado na norma. O tempo do ensaio foi aumentado para 20 minutos com velocidade de  $25 \pm 2$  rpm durante 500 voltas, diferente do tempo de 10 minutos com  $50 \pm 2$  rpm, conforme a norma. \*\* Análises não normatizadas e descritas no texto abaixo.

A composição química orgânica e inorgânica foram realizadas no laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland. A determinação da composição química orgânica (CHN) foi realizada em um equipamento LECO Truespec baseado na norma ASTM D5373. Para determinação do teor de enxofre foi utilizado o equipamento LECO SC-432, por meio do procedimento interno PO-GT-6012, baseado na norma ASTM D4239.

A análise elementar inorgânica foi realizada conforme os procedimentos internos PO-GT-3012, para a determinação do teor de cloreto com leitura por íons seletivos após combustão em bomba com recolhimento de uma solução de carbonato de sódio. A determinação dos demais óxidos na amostra foi realizada por meio do procedimento PO-GT-5023, utilizando-se Espectroscopia de Raio X.

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada nos pellets produzidos a partir das misturas das duas espécies de madeira. Para determinar o comportamento térmico do material foi utilizada uma termo balança gravimétrica, TGA 2000 da marca NAVAS Instruments. A

combustão foi realizada sob condição de ar atmosférico, taxa de aquecimento de 10 °C/min, desde a temperatura ambiente até 1000 °C, até massa residual constante. As curvas termogravimétricas (TG), para a perda de massa, foram definidas em função da temperatura. A primeira derivada (DTG) representada por  $dM/dT$ , foi utilizada para avaliar a velocidade da perda de massa.

A densidade energética total ( $DE_T$ ) foi calculada pelo produto entre o poder calorífico superior (PCS) e a densidade a granel (DB) para os pellets de cada tratamento. A densidade energética líquida ( $DE_L$ ) foi calculada pelo produto entre o poder calorífico líquido (PCL) e a densidade a granel (DB) para os pellets de cada tratamento.

### 3.5 MAPEAMENTO DOS PROBLEMAS ASSOCIADOS À GERAÇÃO E TRATAMENTO DAS CINZAS NA COMBUSTÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A partir dos elementos inorgânicos obtidos na análise elementar dos pellets com diferentes proporções de misturas das matéria-prima (tratamentos) na forma de óxidos, foram utilizadas as equações apresentadas no trabalho de Nunes *et al.* (2019) relacionadas aos índices de escória ( $B/A$  e  $B/A+P$ ), índice de incrustação ( $F_i$ ) e índice de álcali ( $Al$ ), apresentadas nas equações (2), (3), (4) e (5).

$$B/A = \left( \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3} \right) \quad (2)$$

A equação (1) foi desenvolvida para combustíveis fósseis com baixos teores de fósforo. Em um estudo posterior desenvolvido por Benson e Harb (1993), o fósforo foi incluído na equação, ficando na forma como apresentado na Equação (3) e que será  $P_2O_5$  utilizada neste estudo.

$$\frac{B}{A} + P = \left( \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O + P_2O_5}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3} \right) \quad (3)$$

Onde:  $B = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O)$  Elementos de baixa temperatura de fusão e  $A = (SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)$  Elementos de alta temperatura de fusão.

Nota:  $B/A < 0,5$  = baixa propensão à escória;  $0,5 < B/A < 1,0$  = média propensão à escória;  $1,0 < B/A < 1,75$  = alta propensão à escória e  $B/A > 1,75$  = severa propensão à escória (NUNES *et al.*, 2019).

$$F_i = \left( \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3} \right) * (Na_2O + K_2O) \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:  $F_i < 0,6$  = baixa propensão à incrustação;  $0,6 < F_i < 40$  = alta propensão à incrustação;  $F_i > 40$  = severa propensão à incrustação (NUNES *et al.*, 2019).

$$Al = \left( \frac{1 \times 10^6 \times \% \text{ cinzas } \times (K_2O + Na_2O)}{PCS \left( \frac{KJ}{Kg} \right)} \right) \quad \text{Equação (5)}$$

Onde Al representa a quantidade de óxidos alcalinos por unidade de energia do combustível (Kg/GJ).  $Al < 0,17$  = baixa propensão à escória e incrustação;  $0,17 < Al < 0,34$  = alta propensão à escória e incrustação;  $Al > 0,34$  = severa propensão à escória e incrustação (NUNES *et al.*, 2019).

### 3.6 PLANO EXPERIMENTAL

Para todas as propriedades, foram obtidas as médias e coeficiente de variação. Os dados foram submetidos à análise de variância por meio do teste de médias de Scott Knott a um nível de confiança de 95%. Foi aplicado o Coeficiente de Correlação de Pearson e Regressão linear para a obtenção do  $R^2$  e as tendências de comportamento das correlações. As correlações foram estabelecidas entre: (a) as propriedades físicas, químicas e energéticas dos pellets; (b) entre as propriedades dos pellets os parâmetros de processo. Os pacotes estatísticos utilizados foram o EXCEL® e o SISVAR.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MATÉRIA-PRIMA

Os valores médios das propriedades físicas (teor de umidade e densidade a granel) do material *in natura* e das misturas de biomassa que compuseram os tratamentos antes da peletização, estão apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Propriedades físicas das partículas e das misturas de biomassa que compõe os tratamentos antes da peletização.

Propriedade	P100	P75E25	P50E50	P25E75	E100	CV
Teor de umidade (%)	11,55 c	12,22 c	24,49 b	35,01 a	33,20 a	14,37
Densidade granel (kg.m <sup>-3</sup> )	126,38 d	153,61 c	210,50 b	211,57 b	300,81 a	2,12

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Nota: P100: 100% de maravalha de *P. taeda*; P75E25: 75% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 25% do peso da mistura de partículas de *E. benthamii*; P50E50: 50% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 50% do peso da mistura de partículas de *E. benthamii*; P25E75: 25% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 75% do peso da mistura de partículas de *E. benthamii*; E100: 100% de partículas de *E. benthamii*. CV = coeficiente de variação (%).

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não têm diferença significativa pelo teste de médias de Scott Knott ( $P < 0,05$ ).

Antes da peletização todas as misturas foram condicionadas em câmara climatizada até o teor de umidade entre 11 e 12%. No entanto, durante o processo de peletização, a partir do tratamento com 50% de eucalipto, as misturas de biomassa necessitaram de umedecimento para que os pellets se mantivessem íntegros após a passagem pela prensa peletizadora. Também se observou aumento da formação de pó, sendo que o umedecimento também foi utilizado para redução da emissão de pó durante a peletização.

A adição de água foi feita diretamente sobre as misturas dentro do silo de alimentação, por aspersão, antes da entrada na prensa. Ao longo do processo foram sendo coletadas amostras para posterior determinação do teor de umidade médio, sempre que os pellets apresentaram qualidade satisfatória (manutenção da integridade após saída da matriz, sem ruptura ou inchamento).

Portanto, pode-se observar que o teor de umidade ideal para peletização variou entre os tratamentos (Tabela 4). Os tratamentos com 100% de pinus (P100 e P75E25), que não



precisaram de umedecimento, foram estatisticamente semelhantes e tiveram teor de umidade próximo do ajuste feito em câmara climatizada, previamente à peletização. O teor de umidade foi aumentando a medida que a proporção de eucalipto na mistura aumentou. Os tratamentos com 100% e 75% de eucalipto foram semelhantes estatisticamente e tiveram os maiores teores de umidade.

Considerando o *Eucalyptus sp.* como matéria prima para a produção de pellets, Pinto *et al.*, (2015) concluíram que a umidade de entrada da biomassa de madeira, folhas, galhos de ponteiros das árvores a  $\pm 12,0\%$  proporcionou a produção de pellets com melhores propriedades físicas, químicas e mecânicas atendendo a maioria das especificações da norma DIN EN 14961-2. (DIN, 2011). No entanto, o valor apresentado pela literatura não permitiu, neste trabalho a produção de pellets. Neste teor de umidade, os pellets ficavam quebradiços e com muita formação de pó, após a passagem pela prensa.

A proporção de mistura de pinus com eucalipto alterou o teor de umidade requerido para a peletização. Quanto maior a adição de eucalipto na mistura, maior foi a umidade do material requerida para a compactação. Isso se deve ao fato das misturas com maior proporção de eucalipto terem maior densidade a granel (Tabela 4), com maior teor de finos (Tabela 5) e portanto, requerer mais umidade para que ocorra a ligação das partículas tanto fisicamente como quimicamente (amolecimento e ligação da lignina às partículas de madeira).

Os resultados de teor de umidade das biomassas analisadas neste trabalho para os tratamentos P100% e P75%E25% foram inferiores aos obtidos por Brand *et al.* (2018) ao caracterizar energeticamente misturas, da mesma proporção do presente estudo, de matérias primas residuais de grimpas e partículas de *Pinus* (14,79 %).

Entretanto Nielsen *et al.* (2020) e Serrano *et al.* (2011), em estudos sobre a densificação de diferentes biomassas florestais, resíduos de serrarias e resíduos agrícolas, utilizaram matéria-prima com umidade variando de 5 a 23%, o que demonstra que a umidade ideal pode variar de acordo com o material (resíduos) para produção dos pellets.

Com relação a densidade, segundo Tumuluru *et al.* (2011), a densidade a granel da biomassa fresca varia de 150 a 200 kg/m<sup>3</sup> e a densidade a granel de madeira (cavacos ou serragem) varia entre 150 e 250 kg/m<sup>3</sup>. Neste contexto, somente a mistura contendo 100% de partículas de *Eucalyptus beenthami* não ficou entre os valores mencionados na literatura.

Verificou-se que a inclusão das partículas de eucalipto nas misturas contribui para o aumento da densidade a granel das misturas (Tabela 4), havendo diferenças significativa entre os tratamentos para esta propriedade.

Considerando o eucalipto como matéria-prima, Oliveira (2016) analisou a densidade a granel em misturas de bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições verificou que a densidade a granel da serragem de eucalipto foi duas vezes maior do que a do bagaço de cana-de-açúcar, e a variação entre as composições em média foi de 10%. O autor concluiu que apenas os pellets com 100% eucalipto apresentaram densidade a granel mínima exigida para comercialização.

Além de verificar uma relação inversamente proporcional entre a densidade a granel e a taxa de compactação dos pellets, Protásio *et al.* (2011), afirmaram que quanto menor a densidade a granel da biomassa, melhor será a acomodação das partículas e, portanto, maior será o aumento percentual da densidade dos pellets, após a compactação.

Brand *et al.* (2018), em seu estudo comparando as propriedades de grimpas com as do pinus para produção de pellets determinou o valor médio de 86,70 kg/m<sup>3</sup> para a densidade a granel de maravalha de *Pinus* inferior ao obtido neste trabalho. A baixa densidade a granel dos materiais justifica a importância do processo de peletização para o aumento da densidade energética destes resíduos (BRAND *et al.*, 2018). Isso porque há uma correlação direta entre densidade a granel e densidade energética, que na prática se traduz em possibilitar o carregamento de mais energia no mesmo espaço do caminhão ou navio cargueiro, barateando o custo final do serviço de transporte e tornando esse biocombustível mais competitivo (GARCIA *et al.*, 2018a).

As distribuições granulométricas das biomassas utilizadas neste estudo podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica das partículas que compõe os tratamentos antes da peletização.

Peneiras (mm)	P100 (%)	P75E25 (%)	P50E50 (%)	P25E75 (%)	E100 (%)	CV
≥31,5	0,09 a	0,08 a	0,07 a	0,09 a	0,09 a	30,36
16 a 31,49	0,86 a	0,23 a	0,18 a	0,17 a	0,12 a	150,55
8 a 15,99	8,82 a	2,02 a	5,42 a	1,16 a	0,09 a	117,32
3,35 a 7,99	18,88 a	12,91 a	6,62 b	8,15 b	1,02 b	44,51
< 3,35 mm	71,34 d	84,75 c	87,70 b	90,44 b	98,68 a	2,08
<b>Total</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Nota: P100: 100% de maravalha de *P. taeda*; P75E25: 75% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 25% do peso da mistura de partículas de *E. beenthamii*; P50E50: 50% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 50% do peso da mistura de partículas de *E. beenthamii*;

P25E75: 25% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 75% do peso da mistura de partículas de *E. benthamii*; E100: 100% de partículas de *E. benthamii*.

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não têm diferença significativa pelo teste de médias de Scott Knott ( $P < 0,05$ ).

A distribuição granulométrica das partículas variou em função das proporções de mistura de pinus e eucalipto. As alterações foram mais evidentes nas parcelas granulométricas de 3,35 a 7,99 mm e menores que 3,35 mm. Houve também uma tendência de redução da porcentagem de partículas com granulometria entre 3,35 a 31,49 mm a medida que a quantidade de eucalipto era adicionada às misturas. No entanto, a variação estatística só foi observada nas parcelas granulométricas 3,35 a 7,99 mm e  $< 3,35$  mm em função dos elevados valores de coeficiente de variação nas faixas granulométricas anteriores (117,32% e 150,55%). Porém, estes altos valores de coeficiente de variação são aceitáveis dentro deste tipo de análise em função dos baixos valores dos resultados obtidos nestas faixas granulométricas para o tipo de material analisado. Durante o processo de peletização ficou evidente o aumento da quantidade de pó a partir da proporção de 50% de eucalipto na mistura.

Segundo Dias *et al.* (2012), estudos mostram que a condição ideal é a presença de partículas de diferentes tamanhos, pois isso possibilita o melhor empacotamento das partículas e contribui para a alta resistência dos briquetes e pellets.

A granulometria é um fator que interfere diretamente na produção de compactados. No trabalho de Yamaji *et al.*, (2013), a granulometria mais fina dos briquetes ( $> 60$  mesh) para as biomassas de palha de milho, capim elefante e poda de jardim, conferiu uma maior durabilidade e resistência mecânica para os briquetes. Já o uso da granulometria grossa ( $< 60$  mesh) resultou em briquetes muito frágeis e pouco estáveis, não sendo possível avaliar as suas resistências mecânicas, com exceção dos briquetes de capim elefante (YAMAJI *et al.*, 2013).

Brand e Jacinto (2020), ao estudar a qualidade de pellets feitos com diferentes misturas de pinus e resíduos de poda de maçã, verificaram que a homogeneidade da granulometria do tratamento com 100% de partículas de poda de maçã, determinada pela maior quantidade de partículas menores que 3,15 mm (finas) em sua composição (94,3%), pode ter dificultado a compactação do material em relação aos demais tratamentos. Os autores também verificaram que as misturas modificaram a distribuição granulométrica em todos os tratamentos, e somente as partículas com tamanhos entre 16 e 31,4 mm e mostraram iguais estatisticamente entre os tratamentos. Estas conclusões também se aplicam aos resultados obtidos neste trabalho.

As propriedades energéticas das misturas são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades energéticas das misturas utilizadas para a peletização

Propriedade	P100	P75E25	P50E50	P25E75	E100	CV
TV (%)	84,90 a	85,90 a	84,83 a	86,09 a	83,67 a	1,55
TCF (%)	14,53 a	13,62 a	14,31 a	12,96 a	13,33 a	8,85
TC (%)	0,57 c	0,48 c	0,86 b	0,95 b	2,99 a	12,34
PCS (Kcal/kg)	4881 a	4674 b	4635 b	4603 b	4608 b	0,92
PCL (Kcal/Kg)	3961	3745	3108	2571	2663	*
DE <sub>T</sub> (Gcal/m <sup>3</sup> )	0,62	0,72	0,98	0,97	1,39	*
DE <sub>L</sub> (Gcal/m <sup>3</sup> )	0,50	0,58	0,65	0,54	0,80	*

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Nota: \* Os valores de PCL (poder calorífico líquido), DE<sub>T</sub> (densidade energética total) e DE<sub>L</sub> (densidade energética líquida) foram calculados a partir dos valores médios do PCS (poder calorífico superior) e TU (teor de umidade) para o cálculo do poder calorífico líquido e dos valores médios da DG (densidade a granel) e PCS para o cálculo da DE<sub>T</sub> e dos valores médios da DG e PCL para o cálculo da DE<sub>L</sub>. Portanto, estes valores não foram submetidos a ANOVA e teste de médias, não tendo também coeficiente de variação.

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não têm diferença significativa pelo teste de médias de Scott Knott ( $P < 0,05$ )

Quanto a análise imediata, somente o teor de cinzas foi influenciado pela mistura do pinus com o eucalipto, havendo aumento do teor de cinzas a medida que a quantidade de eucalipto foi acrescida às misturas. Até 25% de eucalipto na mistura, o teor de cinzas se manteve constante. Também foram semelhantes em termos de teor de cinzas dos tratamentos com 50 e 75% de eucalipto. A biomassa homogênea de ambas as espécies se diferenciaram entre si.

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo na madeira também estão de acordo com Brito e Barrichello (1982), que preconizaram, em termos gerais, teores de matérias voláteis entre 75% a 85% e de carbono fixo entre 14% a 25%. Segundo esses autores, combustíveis com alto índice de carbono fixo devem ter queima mais lenta, implicando maior tempo de residência destes dentro dos queimadores, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo.

O poder calorífico superior foi maior para a biomassa de *Pinus*. Mesmo a inclusão da quantidade mínima de eucalipto (25%) contribui com a redução do poder calorífico das misturas. Porém entre 25% a 100% de eucalipto o poder calorífico superior não variou entre os tratamentos.

O poder calorífico líquido teve uma redução considerável nas misturas em que o teor de umidade precisou ser elevado para a produção dos pellets (50%, 75% e 100% de eucalipto) (Tabela 4). Portanto se estas misturas fossem utilizadas na combustão, nestas condições de umidade, sem a peletização, a perda energética seria também relevante por unidade de massa (Kcal/kg).

No entanto, considerando tanto a densidade energética total ( $DE_T$ ), quanto a densidade energética líquida ( $DE_L$ ) não houve redução do potencial energético com a inclusão do eucalipto. Pelo contrário, houve aumento. Portanto, a propriedade que teve correlação elevada e significativa com o potencial energético das misturas antes da peletização foi a densidade a granel (Tabela 7) e não o poder calorífico. Assim, o aumento da densidade a granel das misturas determinou de forma significativa o aumento das densidades energéticas total e líquida, sendo comprovado pelo teste de correlação de Pearson, que foi elevado, positivo e significativo entre a densidade energética ( $DE_T$  e  $DE_L$ ) e a densidade a granel.

Além da densidade a granel, a outra propriedade que teve correlação significativa com a densidade energética ( $DE_T$  e  $DE_L$ ) foi o teor de cinzas, sendo que o aumento do teor de cinzas contribuiu para o aumento da densidade energética. No entanto, este fenômeno pode ser explicado pela correlação significativa entre o teor de cinzas e a densidade a granel, que portanto, influenciou a correlação relatada anteriormente.

Tabela 7 – Correlação de Pearson entre as propriedades

	$DE_T$	$DE_L$	TU	DG	CF	TV	TC	PCS	PCL	3,35 a 7,99	< 3,35 mm
$DE_T$	-	<b>0,91*</b>	0,84	<b>1,00*</b>	-0,53	-0,63	<b>0,92*</b>	-0,72	-0,85	<b>-0,96*</b>	<b>0,92*</b>
$DE_L$		-	0,54	<b>0,90*</b>	-0,27	-0,77	<b>0,89*</b>	-0,59	-0,57	<b>-0,88*</b>	0,81
TU			-	0,84					<b>-0,99*</b>		
DG				-	-0,55	-0,61	<b>0,91*</b>	-0,75	-0,86	<b>-0,97*</b>	<b>0,93*</b>
CF					-	-0,23	-0,42	0,73	0,72	0,56	-0,73
TV						-	-0,79	-0,01	0,19	0,47	-0,31
TC							-	-0,45	-0,63	-0,80	0,76
PCS								-	0,83	0,87	<b>-0,92*</b>
PCL									-	0,87	-0,87
3,35 a 7,99 mm										-	<b>-0,97*</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Nota: \* Significativo pelo teste t ( $\alpha=0,05$ ).

A distribuição granulométrica entre 3,35 a 7,99 mm teve correlação significativa com a densidade energética ( $DE_T$  e  $DE_L$ ), de modo que o aumento das partículas nesta granulometria, que preconiza os finos, contribuiu para a redução da densidade energética e para o aumento da densidade energética total ( $r=0,92$ ) (Tabela 7).

Além disso, estas duas faixas granulométricas (3,35 a 7,99 mm e <3,35 mm) tiveram correlação significativa com a densidade a granel. A faixa granulométrica maior reduziu a densidade a granel, enquanto o aumento do teor de finos contribui para o aumento da densidade a granel. O teor de finos teve ainda correlação significativa com o poder calorífico superior e com a faixa granulométrica de 3,35 a 7,99 mm, ambas negativas.

Desta forma, a análise global das propriedades das misturas de biomassa, indica que as propriedades que sofreram a maior influência das misturas foram a densidade a granel, o teor de cinzas, as faixas granulométricas entre 3,35 a 7,99 mm e menor que 3,35 mm (finos) e o poder calorífico superior.

As propriedades que tiveram correlação com a densidade energética foram a densidade a granel, o teor de cinzas o teor de finos de forma positiva e a faixa granulométrica entre 3,35 a 7,99 mm de forma negativa.

#### 4. 2 INFLUÊNCIA DAS MISTURAS DE MATÉRIAS-PRIMAS NOS PARÂMETROS DE PELETIZAÇÃO EM PELETIZADORA DE MATRIZ PLANA

As misturas de biomassa afetaram os parâmetros de peletização (Tabela 8). A velocidade do motor do silo de alimentação da biomassa precisou ser reduzida significativamente a partir de 50% de eucalipto na mistura, não havendo diferença significativa na velocidade até 100% de eucalipto na mistura de biomassa peletizada (Figura 6 e Tabela 8). A pressão dos rolos de compressão sobre a matriz, ao contrário precisou ser aumentada significativamente nas misturas contendo 75% e 100% de eucalipto (Figura 7). A temperatura da matriz foi mais alta nos tratamentos com maior quantidade de eucalipto (75 e 100%) e a temperatura dos pellets também variou entre os tratamentos, porém não parece ter relação com as misturas de biomassa.

Tabela 8 – Variações nos parâmetros de peletização em função das diferentes misturas de biomassa para a produção dos pellets

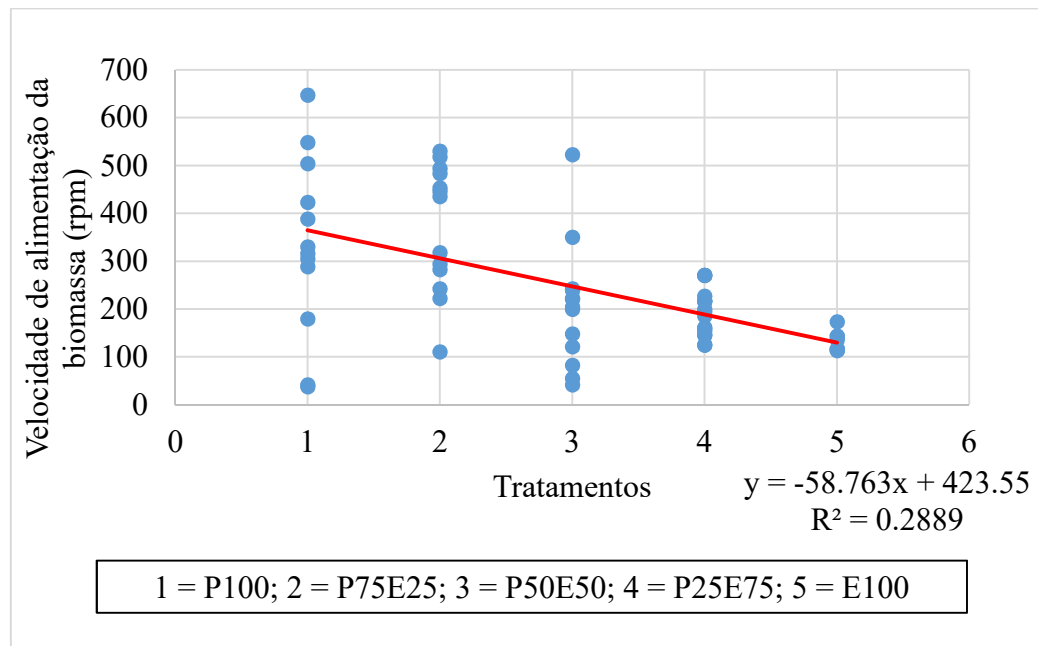
<b>Parâmetros</b>	<b>P100</b>	<b>P75E25</b>	<b>P50E50</b>	<b>P25E75</b>	<b>E100</b>	<b>CV</b>
<b>P</b> <b>(Watts)</b>	5811 a (3610-9272)	6628 a (4902-10830)	5900 a (4408-14288)	6466 a (6186-6593)	5451 a (5130-6597)	26,01
<b>V</b> <b>(rpm)</b>	334 a (37-642)	371 a (110-530)	204 b (41,4-523)	193 b (124-270)	132 b (113-173)	47,97
<b>R</b> <b>(Hz)</b>	49	49	49	49	49	–
<b>T1</b> <b>(°C)</b>	80 e (70-90)	92 c (84-95)	86 d (79-90)	104 a (91-109)	97 b (77-108)	6,78
<b>T2</b> <b>(°C)</b>	75 b (60-83)	84 a (74-87)	79 b (70-84)	81 a (62-88)	79 b (67-86)	7,17
<b>Pressão</b> <b>(Bar)</b>	122 b (100-160)	132 b (100-170)	119 b (80-190)	158 a (130-200)	151 a (130-180)	15,07

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Nota: P: Potência do motor da prensa (Watts); V: velocidade de alimentação da biomassa (rpm); R: velocidade da esteira de resfriamento dos pellets (Hz); T1 = temperatura da matriz peletizadora; T2 = temperatura dos pellets, logo abaixo da matriz; Pressão: pressão dos rolos sobre a matriz (Bar). CV = coeficiente de variação (%).

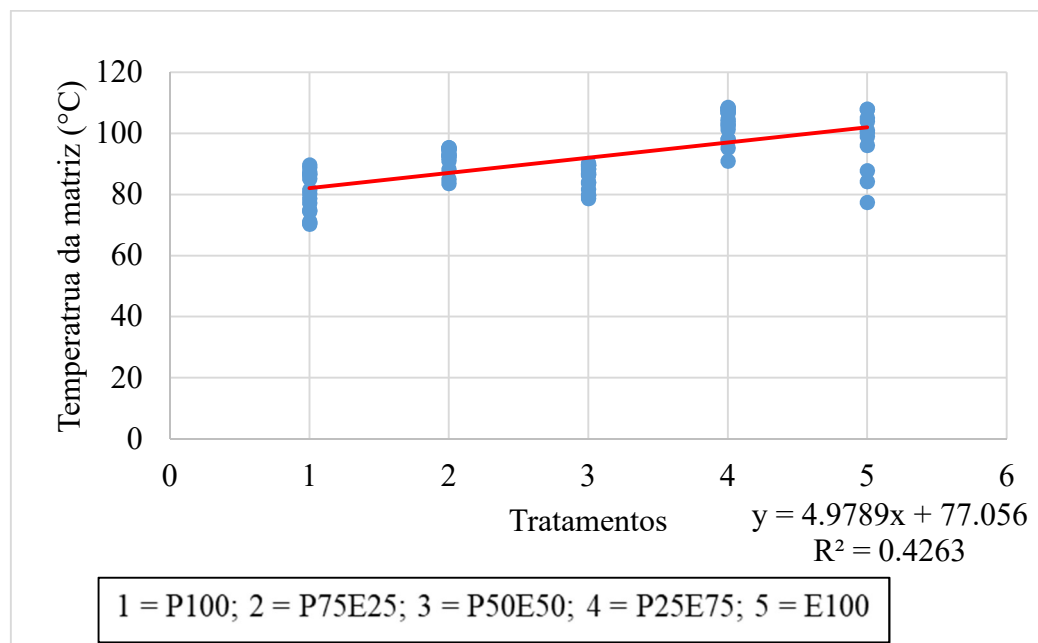
Nota 2: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não têm diferença significativa pelo teste de médias de Scott Knott ( $P < 0,05$ ). Valores entre parênteses significam os valores mínimos e máximos para cada variável.

Figura 6 – Variação da velocidade da alimentação da biomassa na matriz peletizadora em função da proporção de pinus e eucalipto na mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

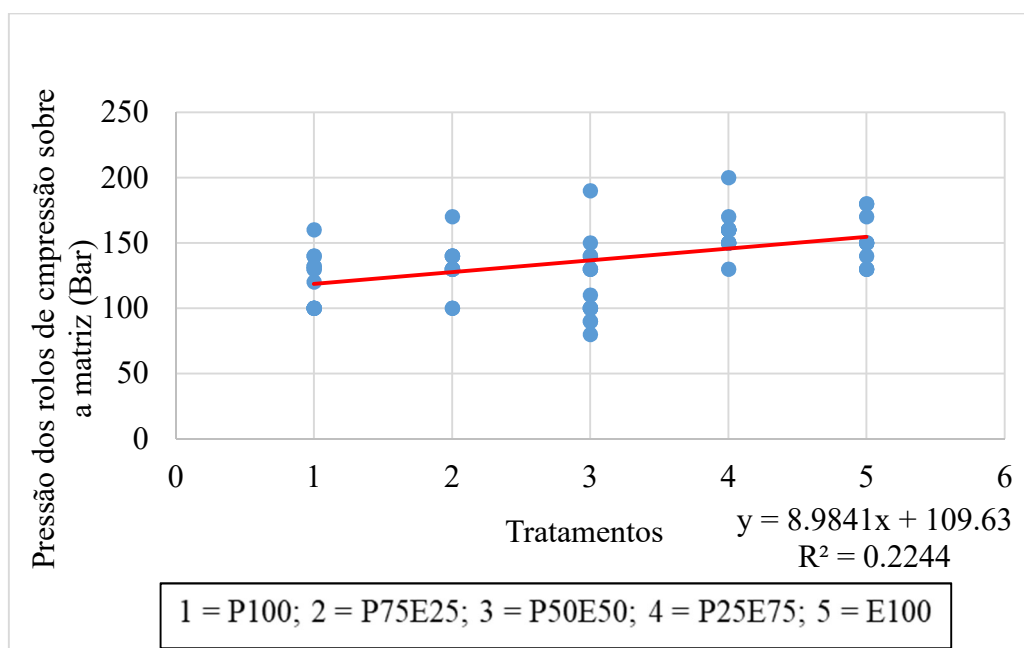
Figura 07 – Variação da temperatura da matriz peletizadora em função da proporção de pinus e eucalipto na mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2020)



Figura 8 – Variação da pressão dos rolos sobre a matriz peletizadora em função da proporção de pinus e eucalipto na mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

A velocidade da alimentação da biomassa foi afetada pelas propriedades físicas das diferentes misturas da biomassa. Isso foi comprovado pelo coeficiente de correlação de Pearson, que indicou haver correlação significativa entre a velocidade de alimentação da biomassa na matriz e as propriedades de teor de umidade, densidade a granel e faixa granulométrica entre 3,35 a 7,99 mm. Os demais parâmetros não apresentaram correlação significativa com as propriedades das misturas de biomassa nos tratamentos (Tabela 9).

O aumento do teor de umidade e da densidade a granel reduziu a velocidade de alimentação da biomassa, enquanto o aumento da quantidade de partículas entre 3,35 a 7,99 mm contribuiu para aumentar a velocidade de alimentação. Pois, quanto maior a densidade a granel do material, era necessário aumentar o teor de umidade para que houvesse uma espécie de aderência das partículas. Já se tratando da quantidade de partículas menores (3,35 a 7,99mm), que eram os finos, dificultaram a pelletização, logo se fez necessário diminuir a velocidade de alimentação.

Entre os parâmetros de peletização, a única correlação significativa observada foi entre a pressão dos rolos de compressão sobre a matriz e a temperatura da matriz. O aumento da pressão contribuiu para o aumento da temperatura da matriz.

Tabela 9 – Correlações das propriedades físicas da biomassa e os parâmetros de peletização para diferentes misturas de pinus e eucalipto para produção de pellets

	<b>P</b>	<b>V</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>Pressão</b>
TU	-0,22	<b>-0,93*</b>	0,78	0,10	0,77
DG	-0,51	<b>-0,92*</b>	0,58	0,10	0,60
3,35 a 7,99	0,36	<b>0,88*</b>	-0,61	-0,26	-0,54
<3,35	-0,17	-0,79	0,76	0,45	0,67
P		0,53	0,32	0,73	0,11
A			-0,53	0,12	-0,55
T1				0,59	<b>0,94*</b>
T2					0,34

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Nota: P=Potência do motor da prensa (Watts); V = Velocidade de alimentação da matéria-prima (rpm); T1 = Temperatura da matriz (°C); T2 = Temperatura dos pellets (°C); Pressão dos rolos sobre a matriz (Bar); TU = teor de umidade da mistura da biomassa no momento da peletização (%); DG = densidade da granel das misturas (Kg/m<sup>3</sup>); 3,35 a 7,99 mm e <3,35 mm = faixas granulométricas da biomassa. O resfriamento não foi incluído na análise de Pearson pois seu ajuste não é feito em função da matéria prima que está sendo peletizada.

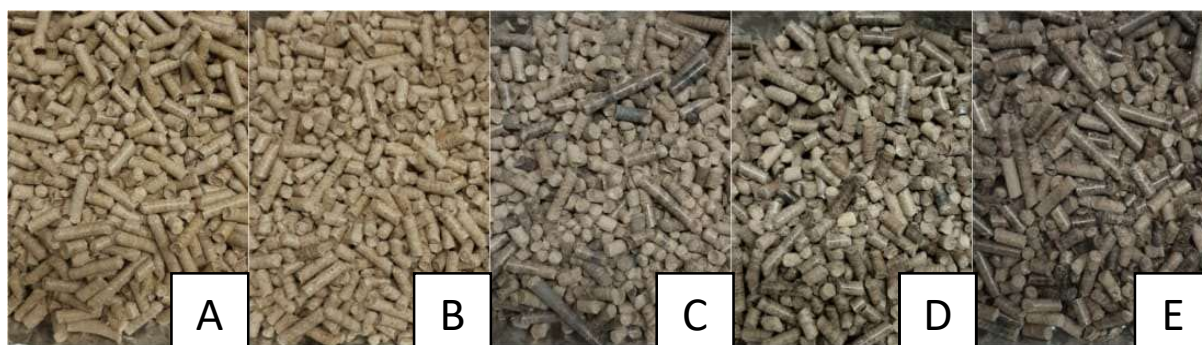
\* Significativo pelo teste t ( $\alpha=0,05$ ).

Portanto, o parâmetro mais importante a ser ajustado quando da mistura de biomassa de pinus com eucalipto foi a velocidade de alimentação da biomassa na matriz peletizadora, que por sua vez foi afetada pelo teor de umidade da biomassa, pela densidade a granel e pela granulometria.

#### 4. 3 INFLUÊNCIA DAS MISTURAS DE BIOMASSA E DOS PARÂMETROS DE PELETIZAÇÃO NA QUALIDADE DOS PELLETS

O resultado dos cinco tratamentos com as composições das biomassas pode ser visualizado na figura 9 abaixo.

Figura 9: Resultado da peletização dos 5 tratamentos



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Nota: A: pellet com 100% e *Pinus taeda*; B pellet com 75% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 25% do peso da mistura de partículas de *E. benthamii*; C pellet com 50% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 50% do peso da mistura de partículas de *E. benthamii*; D pellet com 25% do peso da mistura de maravalha de *P. taeda* e 75% do peso da mistura de partículas de *E. benthamii*; E pellet com 100% de partículas de *E. benthamii*.

A compactação do material realizada pelo processo de peletização proporcionou uma diminuição da umidade e aumento significativo da densidade dos pellets (Tabela 10), comparativamente à biomassa *in natura* (Tabela 4). Pinto *et al.* (2015) ao avaliar o efeito da umidade da matéria prima na produção dos pellets de ponteira de eucalipto observou que o processo de compactação reduziu a umidade dos pellets e afirmou que isso se deve à vaporização da água durante a prensagem.

Houve correlação significativa entre o teor de umidade da biomassa e o teor de umidade e densidade a granel dos pellets (Tabela 13). As misturas de biomassa com maior teor de umidade produziram pellets com menor teor de umidade e maior densidade a granel. Além disso, as misturas com maior densidade a granel produziram pellets com menor teor de umidade.

Ainda em relação às propriedades da biomassa antes da peletização, a granulometria também afetou o teor de umidade dos pellets. As misturas contendo maiores quantidade de partículas entre 3,35 a 7,99 mm resultaram em pellets com maior teor de umidade. Ao contrário,

maior teor de finos nas misturas (<3,35 mm) resultaram em pellets com menor teor de umidade (Tabela 13). Jacinto (2017), em seu estudo analisando misturas de biomassa de grimpá com *Pinus*, constatou que no processo de peletização a granulometria ideal para peletizar em prensa com matriz plana foi de valores próximos ou inferiores a 80% de partículas com dimensões menores que 3,35 mm, mas valores superiores a 5% de partículas acima de 3,35 mm.

Com relação aos parâmetros de peletização, a velocidade de alimentação da biomassa teve correlação significativa com o teor de umidade. O aumento da velocidade de alimentação resultou em pellets com maior teor de umidade. Isso porque, velocidades maiores fazem com que a biomassa fique menos tempo entre os rolos de compressão e a matriz, e a produção seja acelerada, diminuindo o tempo de contato da biomassa com a temperatura elevada da matriz.

As misturas de biomassa tiveram influência significativa sobre o teor de umidade dos pellets. O aumento da proporção de eucalipto contribui para a redução do teor de umidade dos pellets de forma decrescente e gradativa (Tabela 10).

Tabela 10 – Propriedades físicas e energéticas dos pellets contendo diferentes proporções das misturas

Propriedade	P100	P75E25	P50E50	P25E75	E100	CV
<b>TU (%)</b>	10,72 a	9,78 b	6,67 c	5,63 d	3,62 e	2,21
<b>DG (kg.m<sup>-3</sup>)</b>	692,94 d	702,89 d	714,76 c	784,44 a	768,00 b	1,39
<b>PCS (cal/g)</b>	4732 a	4682 a	4633 b	4632 b	4570 b	0,80
<b>PCL (cal/g)</b>	3871	3873	3982	4032	4071	-
<b>DE<sub>T</sub> (Gcal/m<sup>3</sup>)</b>	3,28	3,29	3,31	3,63	3,51	-
<b>DE<sub>L</sub> (Gcal/m<sup>3</sup>)</b>	2,68	2,72	2,85	3,16	3,13	-

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

\* Os valores de PCL, DE<sub>T</sub> e DE<sub>L</sub> foram calculados a partir dos valores médios do PCS e TU para o cálculo do poder calorífico líquido e dos valores médios da DG e PCS para o cálculo da DE<sub>T</sub> e dos valores médios da DG e PCL para o cálculo da DE<sub>L</sub>. Portanto, estes valores não foram submetidos a ANOVA e teste de médias, não tendo também coeficiente de variação. Médias seguidas da mesma letra, na linha, não têm diferença significativa pelo teste de médias de Scott Knott (P<0,05)

Os resultados de teor de umidade mostram que todos os tratamentos se enquadraram na norma, que estabelece valores inferiores a 10% de umidade, tendo em vista que os valores das

propriedades obtidas em laboratório para os pellets foram comparados com os parâmetros existentes na Norma ISO 17225-2, que preconiza um teor de umidade  $\leq 10,0$  para pellets de categoria de uso A (uso doméstico), B (setor de serviços) e I (Industrial). (ISO, 2014).

A composição da mistura alterou a densidade a granel dos pellets, aumentando com o acréscimo de eucalipto na mistura. A inclusão de eucalipto nas misturas contribuiu para o aumento da densidade a granel dos pellets.

Para a densidade a granel da biomassa, antes da peletização, (Tabela 4) foram encontrados valores médios variando de 126,384 kg m<sup>-3</sup>(P100) a 300,807 kg m<sup>-3</sup>(E100). Se comparando com a densidade dos pellets que variaram de 692,94 kg m<sup>-3</sup>(P100%) a 784,44 kg m<sup>-3</sup>(P25E75), verificaram-se aumentos de 255,31% a 548,29% da densidade dos pellets em relação a densidade da matéria-prima que lhe deram origem. A densidade a granel dos pellets mostrou correlação significativa com a pressão dos rolos de compressão sobre a matriz, de modo que o aumento da pressão resultou no aumento da densidade. Além disso, houve correlação significativa desta propriedade com a temperatura da matriz. Temperaturas mais altas da matriz resultaram em pellets com maior densidade aparente.

Os valores obtidos para a densidade a granel dos pellets atenderam ao valor mínimo exigido pela norma ISO 17225 (ISO, 2014). No entanto, a mesma norma determina que o valor máximo dos pellets não deve exceder o valor de 750 Kg.m<sup>-3</sup>. Assim, os tratamentos contendo 75% e 100% de eucalipto não atendem aos parâmetros da norma.

Levando em consideração que o *Pinus* é uma conífera e o *Eucalipto* uma folhosa, Garcia (2017) afirmou que para a produção de pellets com madeiras de coníferas, normalmente com menor densidade são as mais utilizadas, pois possuem maior eficiência durante a produção se comparado às folhosas, que são madeiras mais duras.

Larson *et al.* (2007), produzindo *pellets* com uma peletizadora em escala de laboratório (25 kg/h), concluíram ser muito difícil obter produção estável somente com folhosas devido a dureza do material e a influência do tamanho das partículas. Uma mistura de 60% de coníferas e 40% de folhosas foi utilizada com sucesso. Os autores encontraram, ainda, forte relação entre a qualidade dos *pellets* (durabilidade e densidade) com o tipo de matéria-prima e seu teor de umidade. O teor de umidade ótimo para a característica durabilidade é diferente daquele que melhora a densidade. O autor pontuou então, que a qualidade superior dos *pellets* exige rigorosos ajustes nos equipamentos e controle minucioso de todas as variáveis do processo.

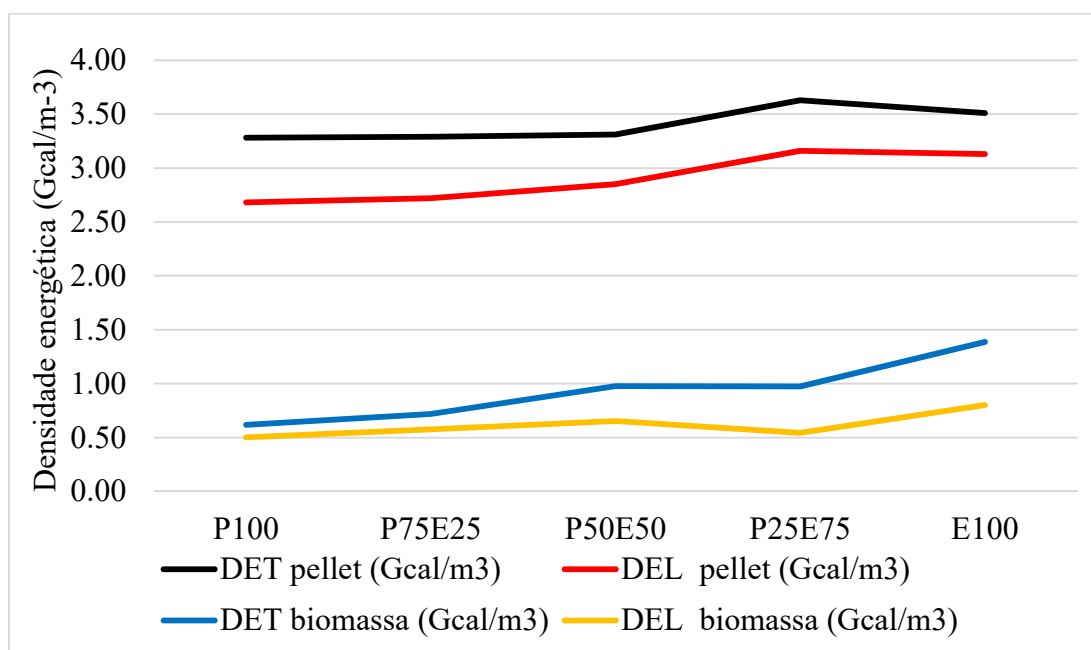
O poder calorífico superior foi alterado pela composição da mistura das biomassas. As misturas contendo a partir de 50% de eucalipto tiveram menor poder calorífico superior, sendo similares até os pellets homogêneos de eucalipto (E100). O poder calorífico superior apresentou

correlação significativa somente com o poder calorífico líquido como já esperado. Dentre os parâmetros de processo o poder calorífico superior apresentou correlação com a velocidade de alimentação da biomassa. O aumento da velocidade de alimentação aumentou o poder calorífico. No entanto, esta relação pode ter sido estabelecida em função do efeito indireto da matéria prima (pinus) que requereu maior velocidade de alimentação e não somente pelo efeito isolado da velocidade de alimentação.

A densidade energética total dos pellets ( $DE_T$ ) teve aumento de 339% (P50E50) a 532% (P100) em relação a densidade energética total da biomassa que lhes deu origem. Já a densidade energética líquida dos pellets ( $DE_L$ ) aumentou entre 391% (E100%) a 581% (P25E75) em relação a matéria prima que lhes deu origem. Assim, fica clara a importância do ganho energético obtido com o processo de peletização.

As diferenças observadas para a propriedade de densidade energética tanto entre os tratamentos quanto entre as misturas de biomassa e os pellets podem ser observadas na figura 10.

Figura 10 – Diferenças na densidade energética entre matéria-prima e pellets e entre as misturas de biomassa usadas para a produção dos pellets



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Todas as propriedades físicas dos pellets variaram em função das misturas de biomassa (pinus e eucalipto) (Tabela 11).

Tabela 11 – Propriedades físicas dos pellets contendo diferentes proporções das misturas

Propriedade	P100	P75E25	P50E50	P25E75	E100	CV
<b>CP (mm)</b>	19,66 a	16,92 b	19,21 a	16,06 b	18,05 a	36,36
<b><math>\phi</math> (mm)</b>	6,19 d	6,27 c	6,18 d	6,32 b	6,40 a	2,66
<b>Dun (kg.m<sup>-3</sup>)</b>	1112 b	1076 b	1210 a	1168 a	1197 a	8,63
<b>DU (%)</b>	96,56 a	92,92 b	89,09 c	93,90 b	93,53 b	1,55
<b>Finos (%)</b>	1,43 d	3,12 b	5,27 a	2,23 c	2,28 c	8,32

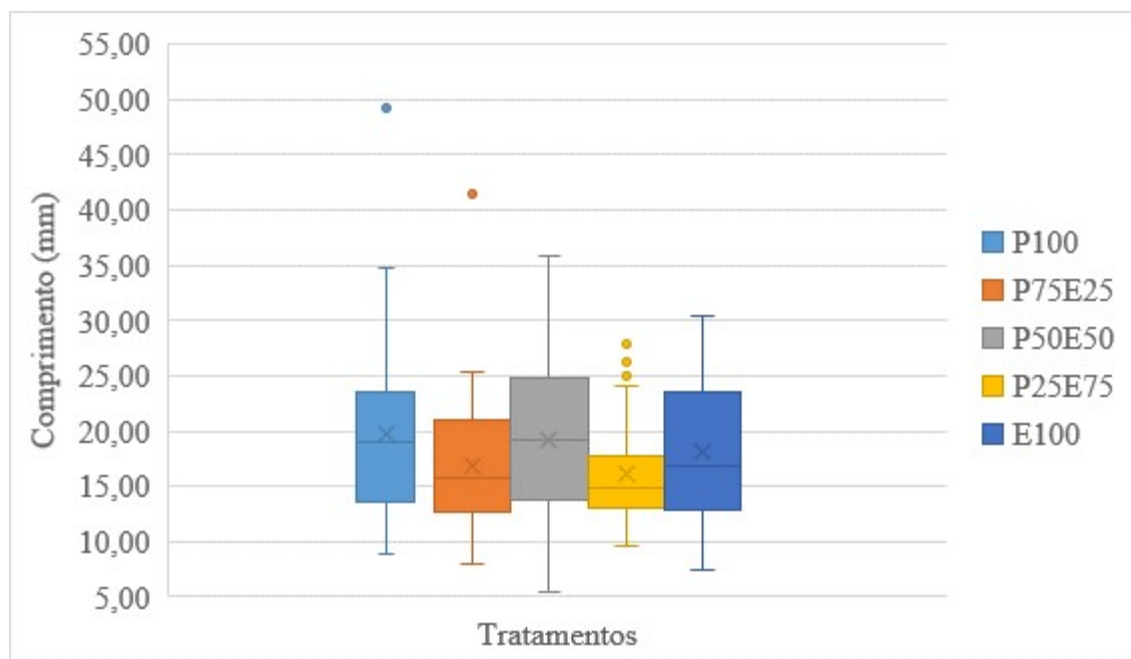
Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Nota: CP = comprimento do pellet;  $\phi$  = diâmetro do pellet; Dun = densidade da unidade; Du = durabilidade; Finos = teor de finos; CV = coeficiente de variação. Médias seguidas da mesma letra, na linha, não têm diferença significativa pelo teste de médias de Scott Knott ( $\alpha=0,05$ )

Os comprimentos dos pellets foram menores nas misturas com as proporções de 25 e 75% (P75E25 e P25E75) em relação aos demais tratamentos. No tratamento P25E75 também foi observada a menor variabilidade nos valores de comprimento (Figura 11). O comprimento dos pellets apresentou correlação somente com a temperatura da matriz (T1) (Tabela 14). Temperaturas mais altas de matriz produziram pellets de menor comprimento. Em temperaturas mais altas os pellets saem da matriz mais maleáveis, devido a lignina ainda estar no estado de transição vítrea. Isso faz com que a faca de corte abaixo da matriz, tenha mais facilidade de cortar os pellets em tamanhos menores.

Jacinto (2017) trabalhando com diferentes biomassas observou que não houve tendência de aumento ou redução do comprimento dos pellets em função da mistura utilizada na fabricação dos pellets. O oposto foi observado neste estudo. Lethikangas (2001) mostrou que há uma relação entre o teor de umidade e o comprimento dos pellets. Segundo o autor, isto indicaria que a umidade estaria funcionando como um elemento “ligante”. Esta relação não foi estabelecida neste trabalho.

Figura 11 – Variação do comprimento (mm) dos pellets em função das misturas de biomassa



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Os diâmetros dos pellets foram maiores para as misturas contendo maior quantidade de eucalipto (75 e 100%), sendo semelhantes os diâmetros dos tratamentos P100 e P50E50. As menores variações entre os diâmetros medidos foram observadas nos tratamentos com 75% de pinus e 25% de eucalipto (P75E25) e 100% de pinus (P100, respectivamente (Figura 12).

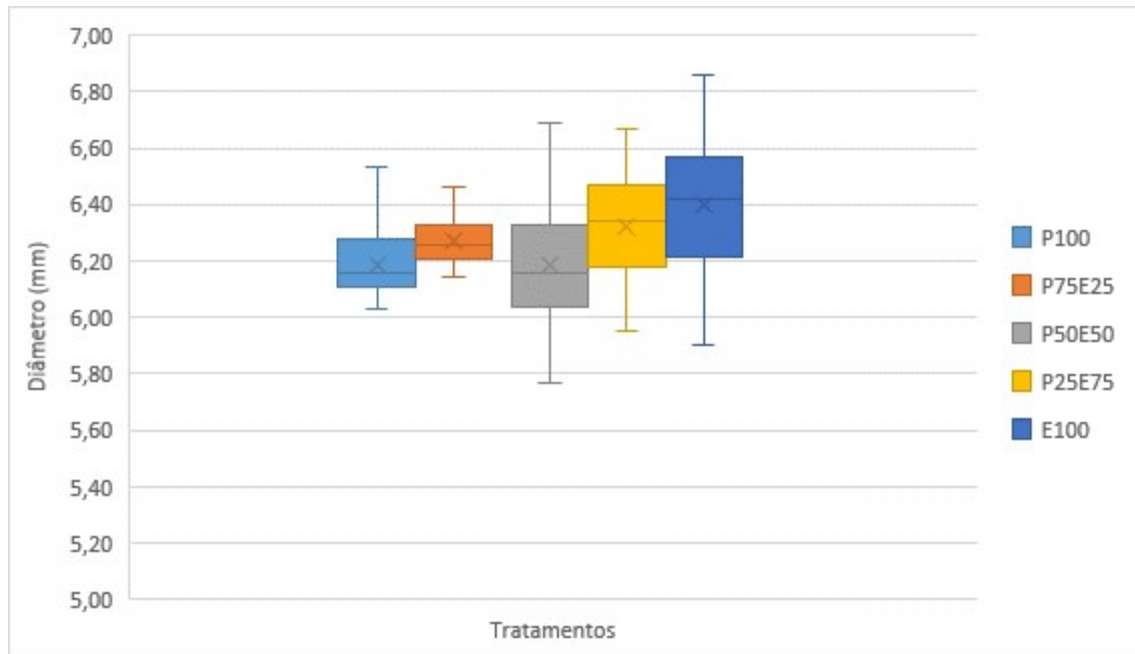
O diâmetro dos pellets não foi influenciado pelas demais propriedades dos pellets ou pelas propriedades da biomassa antes da peletização. O único parâmetro de processo que teve correlação com o diâmetro dos pellets foi a pressão ( $r=0,89$ ) (Tabela 14). Pressões mais elevadas contribuíram para a obtenção de pellets com maior diâmetro. Em condições de pressões mais elevadas no momento da peletização resultou em maior liberação de pressão após a saída da matriz, aumentando desta forma o diâmetro dos pellets.

Os valores do diâmetro dos pellets obtidos no presente estudo foram superiores ao encontrado por Faria *et al.* (2016) que realizou a transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura, em pellets, onde o comprimento médio dos pellets obtido por meio da medição longitudinal variou de 14,85 a 16,18 mm. Contudo Liu *et al.* (2014), afirma que pellets com diâmetros menores permitem uma combustão mais uniforme, comparativamente aos pellets de maiores diâmetros, principalmente em pequenos fornos.

Segundo Mahapatra *et al.* (2010), a alteração dos diâmetros dos pellets pode ser explicada pela migração de vapor de água do centro para a superfície, preenchendo espaços vazios, e isso interrompe as ligações formadas durante a peletização.



Figura 12 – Variação do diâmetro (mm) dos pellets em função das proporções de mistura das biomassas

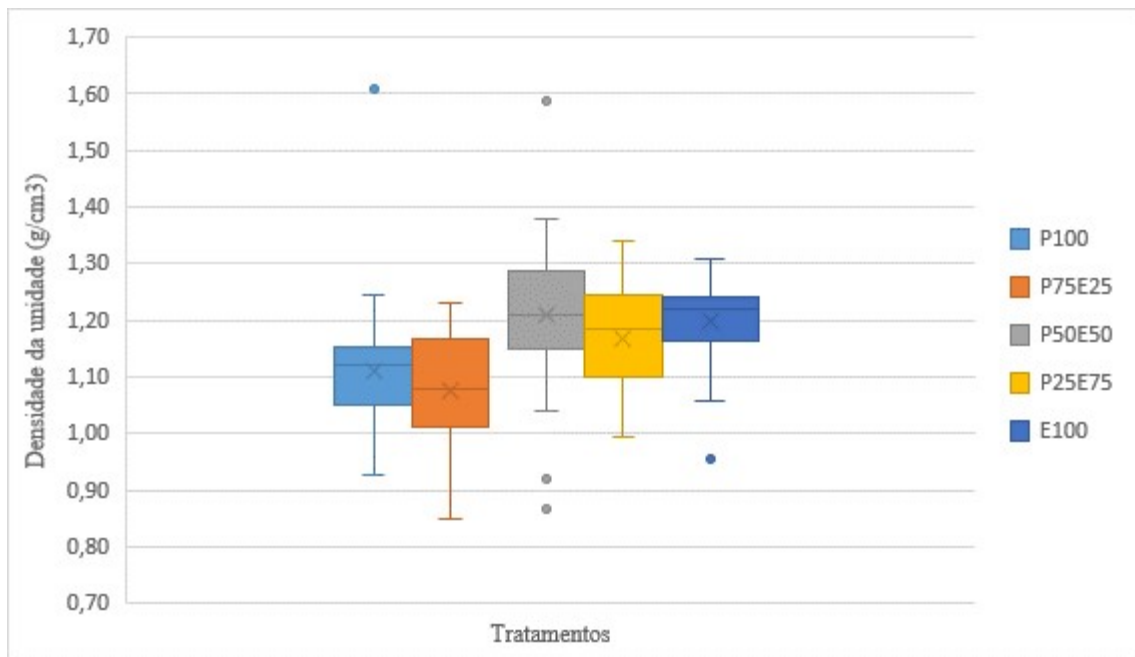


Fonte: Elaborado pela autora, 2020

As dimensões dos pellets, diâmetro e comprimento, obtidas neste experimento, independente dos tratamentos atenderam aos limites especificados na norma para pellets ISO 17225 (ISO, 2014).

A densidade da unidade dos pellets aumentou significativamente a partir da inclusão de 50% de eucalipto na mistura, se mantendo similar à densidade da unidade dos tratamentos com 75 e 100% de eucalipto. A menor variação entre as medidas foi observada nos pellets com 100% de eucalipto (Figura 13).

Figura 13 – Variação da densidade da unidade (g/cm<sup>3</sup>) dos pellets em função das proporções de mistura das biomassas



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

A durabilidade mecânica diminuiu significativamente nos pellets contendo eucalipto nas misturas em comparação com os pellets homogêneos de pinus (P100). A não ser pelo efeito das misturas, a durabilidade mecânica não apresentou correlação com nenhuma outra propriedade dos pellets, da biomassa que lhe deu origem ou com os parâmetros de processo. Somente o tratamento P100% atingiu o valor estabelecido pela ISO 17225-2 para uso comercial e industrial (I3).

O menor valor de teor de finos foi dos pellets homogêneos de pinus (P100), que diferiu dos demais tratamentos contendo eucalipto. O maior teor de finos foi da mistura contendo quantidades iguais dos dois tipos de biomassa (P50E50). O teor de finos teve correlação significativa somente com a durabilidade mecânica, como esperado. Quanto maior o teor de finos, menor a durabilidade mecânica. O teor de finos de todos os tratamentos atendeu a norma ISO 17225 (2014), para as categorias de uso I (Industrial), que preconiza valores  $\leq 4$  (I1),  $\leq 5$  (I2) e  $\leq 6$  (I3).

A durabilidade mecânica e o teor de finos são propriedades importantes para se conhecer o comportamento dos pellets durante o transporte e manuseio, sendo desejável menor valor para finos e maior para durabilidade mecânica. Grandes quantidades de finos podem causar problemas na estocagem, no processo de combustão e causar riscos de explosão (FILBAKK *et al.*, 2011a).

Tabela 12 – Correlações entre as propriedades dos pellets entre si

	DE <sub>T</sub> pellet	DE <sub>L</sub> pellet	TU pellet	DG pellet	PCS pellet	PCL pellet	CP	ø	Dun	DU	F
DE <sub>T</sub> pellet		<b>0,95*</b>	-0,76	<b>0,98*</b>	-0,65	0,81	-0,66	0,75	0,46		
DE <sub>L</sub> pe llet			<b>-0,92*</b>	<b>0,99*</b>	-0,84	<b>0,95*</b>	-0,53	0,78	0,66		
TU pellet				-0,86		<b>-0,99*</b>	0,30	-0,72	-0,83	0,35	-0,15
DG pellet					-0,77	<b>0,89*</b>	-0,62	0,79	0,56	-0,01	-0,20
PCS pellet						<b>-0,93*</b>					
CP								-0,60	0,17	-0,03	0,16
Ø									0,22	0,18	-0,39
Dun										-0,53	0,42
DU											<b>-0,98*</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Tabela 13 – Correlações entre as propriedades dos pellets com as propriedades das misturas in  
*natura*

	DE <sub>T</sub> pellet	DE <sub>L</sub> pellet	TU pellet	DG pellet	PCS pellet	PCL pellet	CP	ø	Dun	DU	F
TU <sub>biomassa</sub>			<b>-0,95*</b>	<b>0,95*</b>							
DG <sub>biomassa</sub>			<b>-0,97*</b>	0,75			-0,19	0,75	0,77	-0,33	0,13
3,35-7,99 mm biomassa			<b>0,96*</b>	-0,72			0,26	-0,67	-0,78	0,53	-0,35
< 3,35 mm biomassa			<b>-0,92*</b>	0,78			-0,48	0,79	0,62	-0,45	0,25
PCS biomassa					0,86						
PCL biomassa						<b>-0,97*</b>					
DET biomassa	0,62										
DEL biomassa		0,51									

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Tabela 14 – Correlações entre as propriedades dos pellets com os parâmetros de peletização

	DE <sub>T</sub> pellet	DE <sub>L</sub> pellet	TU pellet	DG pellet	PCS pellet	PCL pellet	CP	ø	Dun	DU	F
--	---------------------------	---------------------------	--------------	--------------	---------------	---------------	----	---	-----	----	---

P	0,03	-0,17	0,39	-0,06	0,35	-0,39	-0,69	-0,14	-0,57	-0,05	0,08
V	-0,71	-0,87	<b>0,96*</b>	-0,80	<b>0,90*</b>	<b>-0,98*</b>	0,09	-0,56	<b>-0,93*</b>	0,33	-0,16
T1	<b>0,90*</b>	0,86	-0,69	<b>0,90*</b>	-0,66	0,69	<b>-0,89*</b>	0,80	0,26	-0,06	-0,14
T2	0,18	0,16	-0,12	0,21	-0,25	0,04	-0,80	0,34	-0,25	-0,38	0,30
Pressão	<b>0,94*</b>	<b>0,88*</b>	-0,68	<b>0,93*</b>	-0,61	0,70	-0,77	<b>0,89*</b>	0,23	0,24	-0,44

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

#### 4.4 MAPEAMENTO DOS PROBLEMAS ASSOCIADOS À GERAÇÃO E TRATAMENTO DAS CINZAS NA COMBUSTÃO DA BIOMASSA

Como esperado, os teores de enxofre (S), nitrogênio (N) e cloro (Cl) foram baixos em todas as misturas (Tabela 14). Segundo os parâmetros da norma ISO 17225-2, o teor de nitrogênio foi inferior aos estabelecidos pela norma para todas as categorias de uso. Para o teor de enxofre, somente o tratamento P50E50 não pode ser utilizado para nenhuma das categorias de uso. Para o teor de cloro, os pellets com mistura de até 50% de eucalipto (P100, P25E75 e P50E50) podem ser utilizados somente para uso industrial (I3), sendo que os demais tratamentos não atenderam aos requisitos da norma para nenhuma categoria de uso.

Tabela 15 – Composição química elementar orgânica e inorgânica dos pellets com diferentes misturas de biomassa

Composição química (%)	P100	P75E25	P50E50	P25E75	E100
C	46,30	46,50	45,40	47,00	46,20
H	6,85	6,88	6,63	6,57	6,50
N	0,20	0,13	0,09	0,07	0,07
S	0,03	0,04	0,09	0,04	0,04
Cl	0,11	0,10	0,10	0,15	0,14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	6,6	5,5	7,7	6,8
CaO	31,0	34,6	39,1	37,8	41,5
SiO <sub>2</sub>	26,6	18,8	32,5	24,0	26,7
MgO	2,7	16,7	0,1	16,1	3,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,3	10,0	6,1	5,0	4,1
NaO <sub>2</sub>	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	2,0	3,2	2,2	4,1
K <sub>2</sub> O	4,5	4,8	7,5	4,1	9,8
TiO <sub>2</sub>	1,3	0,6	0,6	0,4	0,6

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Quanto a composição química inorgânica (Tabela 15), os óxidos presentes em maior quantidade em todas as misturas foram: o óxido de cálcio, óxido de silício. O sódio se destacou

como terceiro elemento majoritário no P100. O óxido de magnésio esteve presente como terceiro composto majoritário nos pellets P75E25 e no P25E75. O óxido de potássio foi o terceiro composto majoritário nos tratamentos P50E50 e E100.

A tabela 16 mostra os índices de deposição calculados com base na composição química inorgânica das diferentes misturas de biomassa.

Tabela 16 – Índices de deposição calculados com base na composição química inorgânica das diferentes misturas de biomassa

<b>Índices</b>	<b>P100</b>	<b>P75E25</b>	<b>P50E50</b>	<b>P25E75</b>	<b>E100</b>
Índice de escória (B/A)	2,05	2,23	1,29	1,88	1,73
Índice de escória + fósforo (B/A+P)	2,31	2,62	1,45	2,03	1,85
Índice de incrustação (FI)	40,93	10,73	9,70	7,69	16,96
Índice de álcali (Al)	0,06	0,01	0,03	0,02	0,15
<b>Parâmetros</b>	<b>P100</b>	<b>P75E25</b>	<b>P50E50</b>	<b>P25E75</b>	<b>E100</b>
Índice de escória (B/A)	Severa	Severa	Alta	Severa	Alta
Índice de escória + fósforo (B/A+P)	Severa	Severa	Alta	Severa	Alta
Índice de incrustação (FI)	Severa	Alta	Alta	Alta	Alta
Índice de álcali (Al)	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Os índices de escória foram altos ou severos para todas as misturas de biomassa. O índice de incrustação foi severo para P100, diminuindo para alto para os pellets contendo eucalipto. Já o índice de álcali que indica o potencial de corrosão foi baixo para todos os tratamentos. Nunes *et al.* (2019) ao avaliar a utilização de cavacos de madeira de Pinus como combustível para caldeiras industriais observou que, com exceção de uma amostra, todas as demais apresentam alta tendência para escória e incrustação. E verificou que esta diferença pode ser justificada pela origem do combustível utilizado.

O óxido de silício foi o composto que teve correlação significativa com o Índice de escória (B/A) e Índice de escória (B/A)+P. Portanto, o Al é o elemento que mais influenciou as variações observadas neste índice. Assim, quanto maior o teor de sílica nas misturas menor foi o potencial de formação de escória. Keefe *et al.* (2014) afirmaram que na maioria dos casos, a presença destes óxidos pode ser justificada pela contaminação ocorrida durante a silvicultura como corte de árvores, onde normalmente as toras são arrastadas sobre o solo.

Para o índice de incrustação, os óxidos de alumínio, óxido de sódio e o óxido de titânio foram os compostos que tiveram correlação mais forte e significativa. Assim, quanto menos alumínio e maiores teores de sódio e titânio, maiores foram os índices de incrustação.

A (tabela 17) mostra as correlações entre os índices de deposição e os elementos inorgânicos presentes nas misturas de biomassa. Nunes *et al.* (2019) em seu estudo também verificou que não houve diferença na ocorrência de escória em caldeiras industriais em relação aos índices com e sem óxido de fósforo. Como pode ser observado, todas as demais amostras apresentam alta tendência para escória e incrustação. Esta diferença pode ser justificada pela origem do combustível utilizado.

Já para o índice de álcali, não foram os compostos isoladamente que determinaram os valores do índice de álcali, mas sim a quantidade de cinzas presente nos pellets. Misturas contendo maior teor de cinzas resultam em maiores índices de álcali e, portanto, maior potencial de corrosão.

Tabela 17 – Correlações entre os índices de deposição e os elementos inorgânicos presentes nas misturas de biomassa

	B/A	B/A+P	FI	Al
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,18	-0,20	<b>-0,94*</b>	
CaO	-0,65	-0,70	-0,67	
SiO <sub>2</sub>	<b>-0,91*</b>	<b>-0,90*</b>	0,11	
MgO	0,66	0,64	-0,46	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,72		
Na <sub>2</sub> O	0,33	0,32	<b>0,97*</b>	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,46	-0,51	0,46	
K <sub>2</sub> O	-0,60	-0,62	-0,16	0,81
TiO <sub>2</sub>	0,28	0,30	<b>0,97*</b>	
PCS				-0,11
TC				<b>0,93*</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

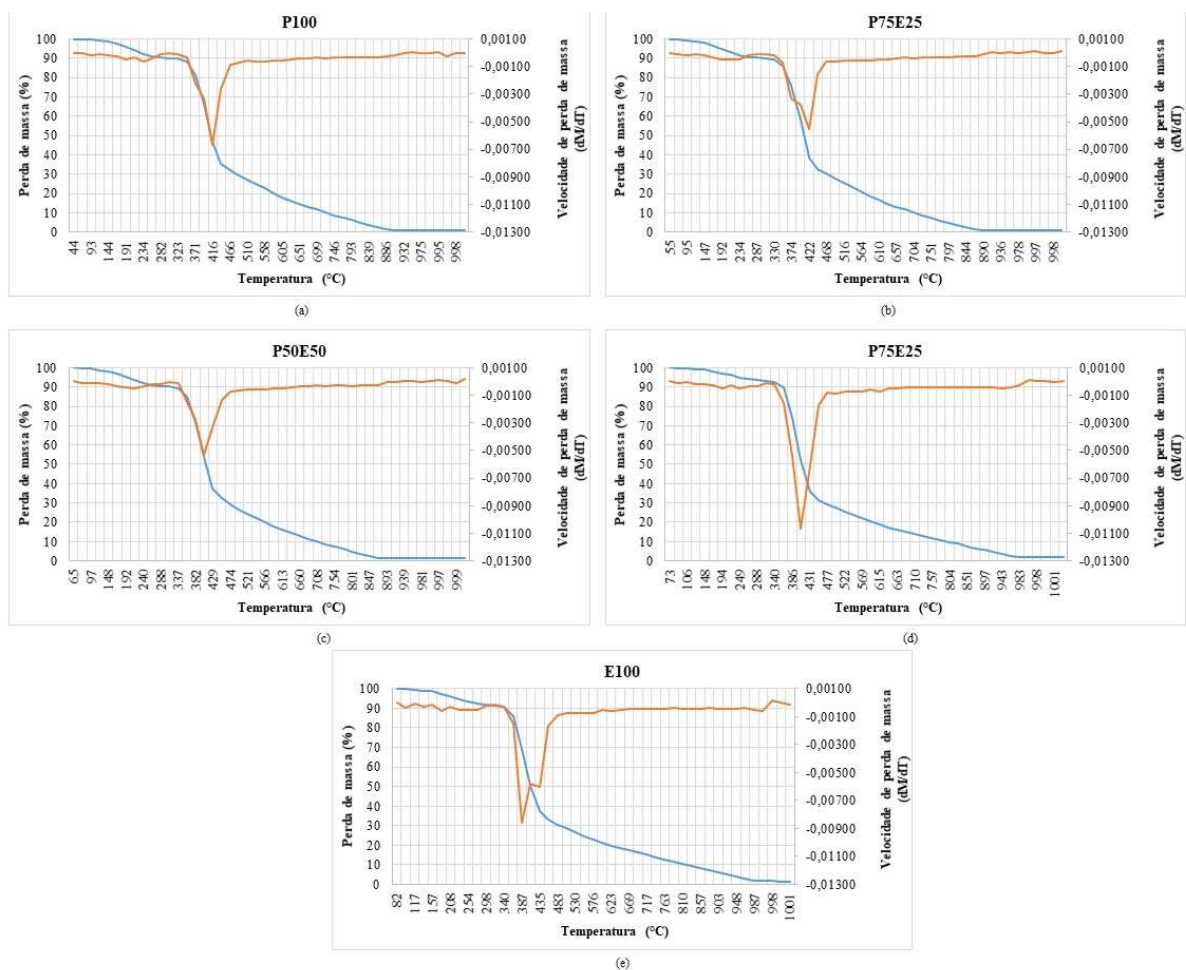
#### 4. 5 ANALISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS PELLETS

O comportamento térmico dos pellets em função das misturas utilizadas na peletização tiveram comportamento similar em termos de temperaturas nas quais ocorreu as passagens pelos estágios I, II e III da combustão (Tabela 17 e Figura 14). No entanto, o pico de maior velocidade de perda de massa que ocorreu no estágio II foi mais acentuado para os pellets com

maior proporção de eucalipto (P25E75 e E100), indicando maior velocidade de queima neste estágio.

Brand *et al.* (2018) ao realizar análise termogravimétrica para caracterização de pellets produzidos com diferentes resíduos florestais e agrícolas, obteve o resultado semelhante ao encontrado no presente trabalho. Concluiu que não houve perda significativa de massa até a temperatura atingir aproximadamente 200°C, que comparando com os resultados obtidos neste estudo preconiza o estágio I. E verificou que após esta temperatura, houve uma ligeira perda de massa que ocorreu enquanto a temperatura estava subindo até 380°C, equivalente ao estágio II.

Figura 14 – Degradação térmica dos pellets com diferentes misturas de biomassa. Pellets com 100% de pinus (a); pellets com 75% de pinus e 25% de eucalipto (b); pellets com 50% de pinus e 50% de eucalipto (c); pellets com 25% de pinus e 75% de eucalipto (d) e pellets com 100% de eucalipto (e)



Fonte: Elaborada pela autora, 2020

Tabela 18 – Etapas de degradação termogravimétrica dos pellets com diferentes misturas de biomassa

Tratamento	Pellet		
	Estágio I	Estágio II	Estágio III
P100	123°C	352°C	443°C
P75E25	124°C	330°C	422°C
P50E50	124°C	337°C	429°C
P25E75	125°C	340°C	431°C
E100	135°C	340°C	435°C

Fonte: Elaborada pela autora, 2020

A massa perdida no estágio I corresponde ao teor de umidade livre contida na amostra no momento da análise (Tabela 18). Mesmo as amostras tendo sido secadas em estufa até massa constante, houve absorção de um pequeno percentual de umidade. O estágio II correspondente a perda de massa equivalente ao teor de voláteis da amostra, enquanto a massa perdida no estágio III corresponde a perda de massa do carbono fixo dos pellets, remanescendo ao final do processo o teor de cinzas (TC).

Tabela 19 – Perda de massa em cada estágio de degradação térmica (%) dos pellets e da lignina residual

Tratamento	Porcentagem de perda de massa (%)			Massa remanescente (%)
	E I	E II	E III	TC
P100	0,82	76,63	22,66	0,71
P75E25	1,19	71,94	27,00	1,06
P50E50	1,22	73,07	25,90	1,03
P25E75	0,64	71,55	25,73	2,72
E100	1,04	71,67	26,75	1,58

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Nota: E I: Estágio I de degradação térmica; E II: Estágio II de degradação térmica; E III: Estágio III de degradação térmica; TC: teor de cinzas (Massa residual estabilizada e remanescente à 1000°C).



A temperatura na qual ocorreu a maior velocidade de perda de massa foi menor para os pellets homogêneos de eucalipto (E100), enquanto a temperatura mais elevada foi registrada para os pellets com 75% de pinus na mistura (P75E25), no ponto de maior velocidade de perda de massa (Tabela 19).

Tabela 20 – Temperaturas de maior velocidade de perda de massa e intervalo de temperatura da perda de massa dos pellets e da lignina residual

Tratamento	Temperatura da maior velocidade de perda de massa	Intervalo de temperatura da perda de massa
P100	416	123-909°C
P75E25	422	124-890°C
P50E50	401	124-916°C
P25E75	405	125-983°C
E100	387	135-1001°C

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Além disso, os intervalos de temperatura nos quais a degradação térmica ocorreu foram maiores para os pellets E100 (866°C); P25E75 (858°C), P50E50 (792°C), P100 (786°C) e P75 e E75 (766°C), indicando que o aumento da quantidade de eucalipto na mistura tornou a combustão dos pellets mais lenta em relação aos pellets com maior proporção de pinus.

Taxas mais baixas para perda de massa de Pinus também foram encontradas por Brand, *et al.* (2018), onde comparando quatro biomassas (grimpa de araucaria, falha de pinhão, poda de maçã e pellets de Pinus) verificaram, assim como neste estudo que a biomassa de Pinus apresentou menor perda de massa se comparada com o Eucalipto.

## 5 CONCLUSÕES

### QUANTO ÀS PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MATÉRIA-PRIMA

A mistura de biomassa contendo *Pinus taeda* e *Eucalyptus benthammii* promoveu alterações nas propriedades de teor de umidade requerido para a produção de pellets, na densidade a granel das partículas, a granulometria, teor de cinzas, poder calorífico superior e densidade energética total e líquida das composições de biomassa. As únicas propriedades que não foram afetadas pelas proporções de mistura foram o teor de voláteis e de carbono fixo da biomassa.

De forma geral, a inclusão de eucalipto nas misturas contribui para o aumento do teor de umidade requerido para peletização; o aumento da densidade a granel das partículas, a redução da proporção de partículas entre 3,35 a 7,99 mm e aumento do teor de finos (<3,35 mm) nas misturas; o aumento do teor de cinzas e da densidade energética. O eucalipto resultou ainda em redução do poder calorífico das misturas de biomassa com pinus.

Dentre as propriedades analisadas da biomassa *in natura*, a densidade a granel, o teor de cinzas e a granulometria foram as mais importantes para as variações observadas na densidade energética das misturas de pinus e eucalipto. Estas também foram as propriedades que tiveram correlações significativas entre si.

### QUANTO A INFLUÊNCIA DAS MISTURAS DE MATÉRIAS-PRIMAS NOS PARÂMETROS DE PELETIZAÇÃO EM PELETIZADORA DE MATRIZ PLANA

Os parâmetros de peletização precisaram ser ajustados para a obtenção de pellets com a qualidade desejada. Os parâmetros que variaram em função das misturas contendo pinus e eucalipto foram a velocidade de alimentação da biomassa; temperatura da matriz; temperatura dos pellets e pressão dos rolos de compressão sobre a matriz.

O aumento da proporção de eucalipto nas misturas resultou na redução da velocidade de alimentação da biomassa na matriz; aumento da temperatura da matriz e aumento da pressão dos rolos de compressão.

A velocidade de alimentação da biomassa teve correlação significativa com o teor de umidade das misturas antes da peletização, a densidade a granel da biomassa e a granulometria das misturas.

### INFLUÊNCIA DAS MISTURAS DE BIOMASSA E DOS PARÂMETROS DE PELETIZAÇÃO NA QUALIDADE DOS PELLETS

As propriedades que foram afetadas pelas misturas da biomassa foram o teor de umidade dos pellets, a densidade a granel, o poder calorífico superior, diâmetro, densidade da unidade, durabilidade mecânica e teor de finos. A inclusão de eucaliptos na mistura contribuiu para a redução do teor de umidade, do poder calorífico superior e da durabilidade mecânica dos pellets. Em contrapartida, o eucalipto aumentou a densidade a granel, a densidade energética, o diâmetro a densidade da unidade e o teor de finos dos pellets.

A relação entre as propriedades da biomassa e dos pellets demonstrou que houve correlação significativa entre o teor de umidade da biomassa *in natura*, sua densidade e granulometria com o teor de umidade dos pellets.

Quanto aos parâmetros de peletização, a velocidade de alimentação da biomassa afetou o teor de umidade dos pellets, seu poder calorífico e o comprimento dos pellets. A temperatura da prensa afetou a densidade energética, a densidade a granel e comprimento dos pellets. A pressão dos rolos de compressão na prensa afetou a densidade energética, a densidade a granel e o diâmetro dos pellets.

### QUANTO AO MAPEAMENTO DOS PROBLEMAS ASSOCIADOS À GERAÇÃO E TRATAMENTO DAS CINZAS NA COMBUSTÃO DA BIOMASSA

Quanto a composição química inorgânica, o óxido de cálcio e óxido de silício foram os compostos presentes em maior proporção em todas as misturas de biomassa. Todas as misturas utilizadas resultaram em pellets com altos ou severas propensões de formação de escória, incrustação, porém baixa propensão a corrosão dos sistemas de queima.

Os compostos que tiveram maior efeito nos índices de deposição foram: o óxido de silício no índice de escória, os óxidos de alumínio, sódio e titânio sobre o índice de incrustação e o teor de cinzas (quantidade de cinzas) no potencial de corrosão.

### QUANTO À ANÁLISE THERMOGRAVIMÉTRICA DOS PELLETS

O comportamento térmico dos pellets das diferentes misturas foi similar em termos de temperaturas nos estágios da combustão. No entanto, o intervalo de temperatura de degradação

térmica e o pico de velocidade de perda de massa indicaram que a combustão dos pellets com inclusão de eucalipto é mais lenta.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. F. P. de. **Pelletização do bagaço de cana-de-açúcar: estudo das propriedades do produto e rendimento do processo**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/150138445.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1762**: Standard Test Method for Chemical Analysis of wood charcoal. PA: American Society for Testing and Materials. 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D5373/2008**: Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke, American Society for Testing and Materials (ASTM): Pennsylvania, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D4239-17: Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6922**: carvão vegetal - ensaios físicos - determinação da massa específica - densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14929**: madeira - determinação do teor de umidade de cavacos - método por secagem em estufa. 2003.
- BACK, E. L. The bonding mechanism in hardboard manufacture. **Holzforschung**, v 4. n. 4, p. 247–258. 1987. DOI: <https://doi.org/10.1515/hfsg.1987.41.4.247>. Disponível em: <https://www.degruyter.com/view/journals/hfsg/41/4/article-p247.xml?language=en>. Acesso em: 23 ago. 2020.
- BENSON, S. A.; HARB, J. N. Fuel minerals, fouling, and slagging. **Energy Fuels**, v. 7, p. 743–745. 1993. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef00042a007>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef00042a007>. Acesso em: 23 ago. 2020.
- BERGMAN, P. C. A. *et al.* **Torrefied biomass for entrained-flow gasification of biomass**. Petten: ECN, 2005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/237749396\\_Torrefaction\\_for\\_Entrained\\_Flow\\_Gasification\\_of\\_Biomass](https://www.researchgate.net/publication/237749396_Torrefaction_for_Entrained_Flow_Gasification_of_Biomass). Acesso em: 23 ago. 2020.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.
- BRAND, M. A. *et al.* Thermogravimetric analysis for characterization of the pellets produced with different forest and agricultural residues. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, n. 11, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20180271>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782018001100300](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782018001100300). Acesso em: 23 ago. 2020.

BRAND, M. A.; JACINTO, R. C. Apple pruning residues: potential for burning in boiler systems and pellet production. **Renewable Energy**, v. 152, p. 458–466. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.037>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120300422>. Acesso em: 23 ago. 2020.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation**: la fabrication du charbon de bois. Aix-en-Provence: ÉDISUD, 1985. 180p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo, 1982. p. 101–137.

BRUN, E. J, *et.al.* Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 48, n. 1, p. 87–92, jan./mar. 2018.

CARASCHI, J. C.; GARCIA, D. P. **Pellets de madeira**: mercado em crescimento. São Paulo: ABIPEL, 2012. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/13467016/pellets-de-madeira-mercado-em-crescimento-abipel>. Acesso em: 23 ago. 2020.

CARONE, M. T. *et al.* Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. **Biomass Bioenergy**, v. 35, ed. 1, p. 402–410. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410003090>. Acesso em: 23 ago. 2020.

CARVALHO, A. M. M. L. *et al.* Produção de pellets da madeira. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Eds.). **Bioenergia & Biorrefinaria**: cana de açúcar e espécies florestais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2013. p. 380–400.

CASTELLANO, J. M. *et al.* Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. **Elsevier**, v. 139, p. 629–636. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.033>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236114009028>. Acesso em: 20 set. 2020.

CIAMPI, G. J. dos S. **Desenvolvimento de um calorímetro para a determinação do conteúdo energético de combustíveis sólidos**. 1992. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264816>. Acesso em: 18 jul. 2020.

CORRÊA, J. L. G. **Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

CORTEZ, L. A. B. *et al.* **Biomassa para Energia**. 1. ed. Campinas: Unicamp, 2008. 728p.

COUTO, L. *et al.* **Produção de pellets de madeira: o caso da bio-energy no espírito santo.** *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 1, p.45-52, 2004.

CUNHA, M. P. S. C. *et al.* **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras.** *In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 3., 1989, São Carlos. *Anais [...]*. São Carlos: IBRAMEM, 1989. v. 2, p. 93-121.

DIAS, J. M. C. S. *et al.* **Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais.** Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN. **DIN 51900: 2.** Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the isoperibol or static-jacket calorimeter, and calculation of net calorific value. Berlin, 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN. **DIN EN 14961-2:** Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Wood pellet's for non-industrial use. Alemanha: CEN, 2011. 15 p.

DÜCK, Tiago Heinrich Medeiros. **Queimador semiautomático de pellets de Madeira**, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/1876>. Acesso em: 30 jun. 2020.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION e BS EN 15103. **Solid Biofuels. Determination of Bulk Density.** Brussels, 2010, 2009, p. 16.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION e CEN. EN 14774E3. **Determination of moisture content e Part 3:** oven dry method. Moisture in general analysis sample. Brussels, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION E CEN. EN 15149-1. **Solid Biofuels e Determination of Particle Size Distribution e Part 1:** Oscillating Screen Method Using Sieve Apertures of 1 Mm and above. Brussels, 2010, p. 13.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION e CEN. EN 15210-1. **Solid Biofuels. Determination of mechanical durability of pellets and briquettes Part 1:** Pellets. Brussels, 2010, p. 12.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION e CEN. EN 16127. **Solid Biofuels. Determination of length and diameter of pellets.** Brussels, 2012, p. 10.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN. EN ISO 17225-2:2014-**Solid Solid Biofuels – Fuel Specifications and Classes – Part 2:** Graded Wood Pellets.Brussels, 2014.

FARIA W. S , *et al.* Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em Pellets para geração de energia térmica. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 137–147, jan./mar. 2016.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: Walter de Gruyter, 1989. 613 p.

FERNANDEZ, B. O. *et al.* Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1. 2017.

FILBAKK, T. *et al.* The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. **Biomass & Bioenergy**, v. 35, n. 8, p. 3342–3349. 2011a.

FILBAKK, T. *et al.* The influence of storage and drying methods for Scots pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters. **Fuel Processing Technology**, v. 92, p. 871–878. 2011b.

FRANKE, M.; REY, A. “Improving Pellet Quality eficiência.” **Feed Tech**. v. 10, n. 3, p. 12–5. 2006.

FREITAS, A. J. *et al.* Efeito da pressão e do tempo de compactação nas propriedades de briquetes de resíduos madeireiros de paricá. **Nativa, Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v. 4, n. 6, p. 380–385, nov./dez. 2016.

FURTADO, T. S. *et al.* Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 101–106. 2010.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/94403>. Acesso em: 22 set. 2020.

GARCIA, D. P. *et al.* Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 135, n. 2, p. 14–18. 2013.

GARCIA, D. P. **Técnicas multivariadas (HCA e PCA) aplicadas na avaliação de biomassas vegetais para produção de pellets**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/150179>. Acesso em: 22 set. 2020.

GARCIA, D. P. *et al.* The wood pellets sector in Brazil. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, 21–28. 2017.

GARCIA, D. P. *et al.* Qualidade dos pellets de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225. **Revista Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 9, n. 1, p. 45–53. 2018a.

GARCIA, D. P. *et al.* Map of brazilian biofuels producers pellets. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 4, p. 333–339. 2018b.



GIL, M. *et al.* Milling and handling *Cynara Cardunculus* L. for use as solid biofuel: Experimental tests. **Biomass and Bioenergy**, v, 41, p. 145–156. 2012.

HAHN, B. **Pellets for Europe: Existing Guidelines and Quality Assurance for Fuel pellets**. Áustria: St. Pölten, 2004, 20 p.

HARUN, N.Y.; AFZAL, M. T. Effect of article size on mechanical properties of pellets made from biomass blends: procedia engineering. **Elsevier**, 148, p. 93–99. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.445>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816309122>. Acesso em: 01 set. 2020.

HOLLEY, C. A. **The densification of biomass by roll briquetting**. Proceedings of the Institute for Briquetting and Agglomeration. (IBA), 1983.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) .Disponível em < <https://agenciabrasil.ebc.com.br/tags/ibge> > Acessado em 08 de março de 2021.

IWAKIRI, S. *et. al.* Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto. **Scientia Agraria**, v.1, n. 1-2, p. 23–28. 2000.

JACINTO, R. C. **Produção de pellets para energia usando diferentes resíduos de biomassa agrícolas e florestais**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade de Estado de Santa Catarina, Lages, 2017. Disponível em: [https://www.udesc.br/arquivos/cav/id\\_cpmenu/1484/Disserta\\_\\_o\\_\\_Rodolfo\\_Cardoso\\_Jacinto\\_15682105945705\\_1484.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1484/Disserta__o__Rodolfo_Cardoso_Jacinto_15682105945705_1484.pdf). Acesso em: 25 set. 2020.

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. (Comunicação Técnica, 1797).

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337–359. 2009

KEEFE, R. *et al.* Woody biomass logistics. In: **Cellulosic Energy Cropping Systems**. Wiley-Blackwell, 2014. p. 251–279. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118676332.ch14>.

KLEIN, A. **Peletização de rações aspectos técnicos, custo e benefício e inovações tecnológicas**. In: CONFERÊNCIA FACTA 2009 DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AVÍCOLA; CONGRESSO BRASILEIRO DE AVICULTURA, 21. 2009.

KURAUCHI, M. H. N. **Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. São Paulo, 2014.

LARSON, S. H. *et al.* High quality biofuel pellet production from precompacted low density raw materials. Swedish University of Agricultural Sciences Faculty of Natural Resources And Agricultural Sciences. **Bioresource Technology**, Umea, v. 99, n. 5, p.7176–7182. aug. 2007.

LEE, S. M. *et al.* Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. **Biomass & Bioenergy**, v. 48, p. 1–9. 2013.

LETHIKANGAS, P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. **Biomass and Bioenergy**, Uppsala, v. 19, n. 20, p. 351–360, aug. 2001.

LEHMANN, B. *et al.* Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. **BioMass and Bioenergy**, v. 44, p. 150–159. 2012.

LI, H. *et al.* Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. **Applied Energy**, London, v. 93, p. 680–685. 2012.

LIU, Z. *et al.* Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. **Applied Energy**, London, v. 113, p. 1315–1322. 2014.

LIMA, E. G.; SILVA, D. A. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de Arapongas-PR. **Floresta**, Curitiba, v. 35, n. 1, p. 203, jan./abr. 2005.

LOBÃO, M.S. *et al.* Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.889-894, 2004.

MACBAIN, R. **Pelleting animal feed**. Chicago, IL: American Feed Manufacturing Association, 1966.

MAHAPATRA, A. *et al.* Effects of moisture change on the physical and thermal properties of sericea lespedeza pellets. **International Agricultural Engineering Journal**, Bangkok, v. 19, n. 3, p. 23–29. 2010

MIGLIORINI, A. J. Desinfecção de biomassa florestal. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.1, n.2, p. C.1–C.9, jul.1980.

MORAIS, D. M. **Briquetes de resíduos ligno-celulósicos como potencial energético para queima de blocos cerâmicos: uma aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o Distrito Federal**. 2007. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/3574>. Acesso em: 01 set. 2020

MORITZ, J. S; LILLY, K. G. S. Production strategies and feeding opportunities for pellets of high quality. **AGRIS**, p. 85–90. 2010.

NIELSEN, S. K. *et al.* Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process: powder technology. **Elsevier**, v. 364, p. 971–985. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591019308745>. Acesso em: 01 set. 2020.

NILSSON, D. *et al.* Pellet production from agricultural raw materials—A systems study. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 679–689. 2011.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, I. B.; KLOCK, U. Caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1. 1998. DOI: <https://doi.org/10.5902/19805098352>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/352/0>. Acesso em: 01 set. 2020.

NOGUEIRA, E. W.; BISPO, C. J. C.; FRANCO, D. S. Potencial de utilização do eucalipto para geração de energia no município de Paragominas/PA, Brasil. CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 4., 2014, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves-RS: FIEB, 2014.

NUNES, L. J. *et al.* Evaluation of the utilization of woodchips as fuel for industrial boilers. **Journal of cleaner production**, v. 223, p. 270–277. 2019.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, GB, v. 27, n. 6, p. 653–669. 2004.

OLIVEIRA, B. M. **Qualidade de pellets de bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo Jerônimo Monteiro – ES, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/7646>. Acesso em: 03 set. 2020.

PESSOA FILHO, J. S. **Análise Térmica e Energética de Capim Brachiária**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

PINTO, A. A. S. *et al.* Caracterização de pellets de ponteira de eucalipto. **Ciência da Madeira**, (Brazilian Journal of Wood Science), v. 6, n. 3, p. 232–236. 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p232-236. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/view/7145>. Acesso em: 03 set 2020.

PROTÁSIO, T. de P. *et al.* Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 31, n. 68, p. 273, 2011. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/288>. Acesso em: 31 ago. 2020.

PROTÁSIO, T. de P. *et al.* Caracterização energética de pellets in natura e torreficados produzidos com madeira residual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 35, n. 84, p. 435–442, 2015. DOI: 10.4336/2015.pfb.35.84.843. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/843>. Acesso em: 31 ago. 2020.

RELOVAA, I. *et al.* Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of Pinus caribaea Morelet: Particle size, moisture and pressure. **Biomass and bio energy**, v. 33, p. 1351–1357, 2009.

ROWELL, R. M. *et al.* Cell Wall Chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. New York: Taylor & Francis Group, 2005. Cap. 03.

SÁ, A. **Caracterização da recolha de matéria-prima para a produção de pellets**. 2009. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/2485>. Acesso em: 03 set. 2020.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas: Átomo, 2010.

SANTOS, F. *et al.* **Bioenergia & Biorrefinaria: cana de açúcar e espécies florestais**. 1. ed. Viçosa: Produção Independente, 2013. 551 p.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)- Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/3594>. Acesso em: 03 set. 2020.

SANTOS, M. L. *et al.* Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 507–511. 2011.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/2775>. Acesso em: 03 set. 2020.

SERRANO, C. *et al.* Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 3, p. 699–706. 2011.

SIQUEIRA, H. F. de. **Efeitos de aditivos na qualidade de pellets para uso energético**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/21906>. Acesso em: 03 set. 2020.

SILVA, D. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensados**. 2001. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SOARES, V. C. Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades. 2011. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/2933>. Acesso em: 03 set. 2020.

SOUZA, M. M. de. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de Pinus taeda L.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SOUZA, M. M. de; SILVA, D. A. da; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 325–334. 2011.

SPANHOL, A. *et al.* Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 833–844, out. / dez. 2015.

STAHL, M.; BERGHEL, J. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 4849–4854. 2011.

STELTE, *et al.* Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. **Elsevier**, v. 90, ed. 11, p. 3285–3290. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111002730>. Acesso em: 02 set. 2020.

TABIL, L.; SOKHANSANJ, S. Process conditions affecting the physical quality of alfalfa pellets. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 12, n. 3, p. 345–350. 1996. DOI: 10.13031 / 2013.25658.

TEIXEIRA, M. A. **Biomassa de babaçu no Brasil**. São Paulo: UNICAMP, 1973.

TEMMERMAN, M. *et al.* Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. **Elsevier: Biomass and Bioenergy**, v. 30, ed. 11, p. 964–972. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953406001024>. Acesso em: 02 set. 2020.

THEK, G.; OBERNBERGER, I. **The pellet handbook: the production and thermal utilization of biomass pellets**. London: Routledge, 2010.

THEERARATTANANOON, K. *et al.* Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw and big bluestem. **Industrial Crops and Products**, v. 33, p. 325–332. 2011.

TRUGILHO, P. F. *et al.* Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, v. 2 n. 1. 1996.

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

TUMURULU, J. S. **Effect of process variables on the density and durability of the pellet's made from high moisture corn stover**. *Biosystems Engineering*, v. 119, p. 44–57. 2014.

TURNER, R. **Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality**. *Feed Management* 1995.

VALE, A. T. do. *et al.* Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* HillEx-Maiden e *acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Revista Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83–88. 2000.

VIDAL, A. C. F; HORA, A. B. da. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES**, Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 261–314, mar. 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523>. Acesso em: 28/01/2021

YAMAJI, F. M. *et al.* Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 28, n. 1, p. 11–15, jan./mar. 2013.

**DOI:** <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2013v28n1p11-15>. Disponível em: <http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/111#:~:text=Um%20dos%20principais%20cuidados%20deve,compromete%20a%20qualidade%20dos%20briquetes.&text=Palavras%2Dchave%3A%20biomassa%2C%20bioenergia%2C%20res%C3%ADduos>. Acesso em: 03 set. 2020.

ZANOTTO, D. L.; BELLAYER, C. Método de determinação da granulometria de ingredientes para uso em rações de suínos e aves. **Comunicado Técnico EMBRAPA**, 215, p. 1–5, dez. 1996. Disponível em: [http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc\\_publicacoes/cot215.pdf](http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/cot215.pdf). Acesso em: 03 set. 2020.