



NAYARA TAMIRES DA SILVA CARVALHO

**QUALIDADE DE *PELLETS* PRODUZIDOS COM MISTURAS
DE PARTÍCULAS DE MADEIRAS E COM ADIÇÃO DE
LIGNINA KRAFT**

LAVRAS – MG

2019

NAYARA TAMIRES DA SILVA CARVALHO

**QUALIDADE DE *PELLETS* PRODUZIDOS COM MISTURAS
DE PARTÍCULAS DE MADEIRAS E COM ADIÇÃO DE
LIGNINA KRAFT**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Prof^a. Dr^a. Maria Lúcia Bianchi

Orientadora

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Coorientador

LAVRAS – MG

2019

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

Carvalho, Nayara Tamires da Silva.

Qualidade de *pellets* produzidos com misturas de partículas de madeiras e com adição de lignina kraft / Nayara Tamires da Silva Carvalho. - 2019.

95 p. : il.

Orientador(a): Maria Lúcia Bianchi.

Coorientador(a): Paulo Fernando Trugilho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Biocombustível. 2. Densificação da biomassa. 3. Aditivo. I. Bianchi, Maria Lúcia. II. Trugilho, Paulo Fernando. III. Título.

NAYARA TAMIRES DA SILVA CARVALHO

**QUALIDADE DE *PELLETS* PRODUZIDOS COM MISTURAS
DE PARTÍCULAS DE MADEIRAS E COM ADIÇÃO DE
LIGNINA KRAFT**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2019.

Dr. Jonas Leal Neto

Dra. Tattiane Gomes Costa

Prof^a. Dr^a. Maria Lúcia Bianchi

Orientadora

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Coorientador

LAVRAS – MG

2019

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, por me conceder saúde, força e coragem para seguir em frente.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade concedida.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos de mestrado, ao CNPq e à FAPEMIG.

Aos meus orientadores, Maria Lúcia Bianchi e Paulo Fernando Trugilho agradeço imensamente por todos os ensinamentos durante o mestrado, toda paciência, disponibilidade e colaboração.

À Biofogo, representada pelo Sr. René Truninger, pela doação da matéria-prima utilizada na execução do trabalho.

À professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pela disponibilização da estrutura e equipamentos do LAPEM – UFV, para a produção dos *pellets*.

Ao Mateus Magalhães, Eder Cabral e Luciano Junqueira que não mediram esforços para me auxiliar no período que passei no LAPEM.

A todos do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, que direta ou indiretamente fizeram parte desse trabalho.

Ao Rodrigo Simetti, pela grande ajuda e amizade.

As queridas Carine Setter, Evelize Amaral, Luana Santos e Thawane Rodrigues pela amizade, apoio e por tornarem meus dias mais leves e felizes.

A Thaty Antunes por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis.

A Paula Santos por sua colaboração e paciência nos meus momentos de desespero.

A minha família, em especial a minha mãe, Vandinha, razão da minha vida. Obrigada pelo apoio incondicional, por todo amor e orações.

A todos vocês, tudo o que eu dizer é pouco perto do que representam pra mim. MUITO OBRIGADA, de coração!

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	6
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	8
2.1 Biomassa para produção de energia	8
2.2 <i>Pellets</i>	9
2.3 Processo de produção de <i>pellets</i> de madeira	11
2.3.1 Adição de Lignina Kraft.....	13
2.4 Mercado de <i>Pellets</i>	14
2.4.1 Mundial	14
2.4.2 Mercado Brasileiro.....	16
2.5 Normatização dos <i>pellets</i> para comercialização.....	19
2.6 Matéria-prima: <i>Eucalyptus</i> sp e <i>Pinus</i> sp	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
ARTIGO I	30
1 INTRODUÇÃO	32
2. MATERIAL E MÉTODOS	34
2.1 Obtenção e preparo da matéria-prima: <i>Eucalyptus</i> (E) e <i>Pinus</i> (P).....	34
2.2 Caracterização da matéria-prima.....	34
2.3 Processo de peletização.....	36
2.4 Caracterização dos <i>pellets</i>	37
2.4.1 Propriedades Físicas	37
2.4.2 Propriedades Químicas.....	37
2.4.3 Propriedades Energéticas	38
2.4.4 Propriedades Mecânicas.....	38
2.5 Análise estatística dos dados	39
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
3.1 Caracterização das Biomassas.....	40
3.2 Caracterização dos <i>Pellets</i>	47
4 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICE	63
ARTIGO II.....	66
1 INTRODUÇÃO	68
2 MATERIAL E MÉTODOS	70
2.1 Obtenção e preparo da matéria-prima	70

2.2 Caracterização da matéria-prima.....	71
2.3 Processo de peletização.....	71
2.4 Propriedades dos <i>pellets</i>	72
2.5 Análise Estatística	73
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
3.1 Caracterização da matéria-prima.....	74
3.2 Caracterização dos <i>pellets</i>	76
4 CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICE	88

RESUMO

Impulsionado por questões ambientais e acordos entre diversos países do mundo para a diminuição das fontes de energias fósseis, o consumo mundial de *pellets* tem aumentado intermitentemente. Este fato levou o *pellet* à condição de “commodity” negociada nos mercados internacionais para abastecer usinas termoelétricas das maiores empresas de fornecimento de energia elétrica da Europa. O desenvolvimento da produção de *pellets* no Brasil é promissor devido à aptidão florestal do país, com abundância de matéria-prima. Contudo, há poucos estudos sobre peletização no país. Por isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar as propriedades da matéria-prima e dos *pellets* produzidos com partículas de madeira de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. e o uso da lignina como aditivo na produção desse biocombustível. O trabalho foi dividido em dois artigos. No Artigo I foram avaliadas diferentes proporções entre partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. Após a caracterização das biomassas, determinaram-se as propriedades físicas, químicas, energéticas e mecânicas dos *pellets* produzidos. O teor de cloro das madeiras mostrou-se adequado às normas internacionais. *Pellets* com 80% de eucalipto e 20% de pinus se destacaram quanto às densidades, taxa de compactação e propriedades mecânicas. No Artigo II, o objetivo foi avaliar a influência da adição de lignina kraft nas propriedades dos *pellets* produzidos. Utilizou-se para compor os tratamentos 50% de eucalipto e 50% de pinus. Na produção dos *pellets* foram adicionados 1, 2 e 4% de lignina kraft, em relação à massa seca da matéria-prima. Os *pellets* foram produzidos em prensa peletizadora laboratorial com matriz circular horizontal. Foi realizada a caracterização da mistura de biomassa e da lignina utilizada. Foram avaliadas as propriedades dos *pellets* quanto à umidade, poder calorífico superior, comprimento e diâmetro, densidade a granel e unitária, densidade energética a granel e unitária, teor de cinzas, teor de finos, durabilidade mecânica e dureza. Conclui-se que a adição de lignina para produção de *pellets* é viável, principalmente quando se deseja melhorar as características mecânicas desse biocombustível.

Palavras chave: Energia renovável. Compactação da biomassa. Aditivo

ABSTRACT

Driven by the environment, global pellet consumption has increased intermittently. This fact led the ball to the condition of "commodity" to buy the lands to supply the thermoelectric power plants of the companies of electricity supply of Europe. The development of pellet production in Brazil is promising due to the country's forestry capacity, with an abundance of raw material. Only a few studies on pelleting in the country. For this reason, the work was evaluated as the properties of the raw material of the pellets and wood of *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp. and the use of lignin as an additive in the production of this biofuel. The paper was divided into two articles. Notions regarding the proportions between *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp. After characterization of the biomass, the physical, chemical, energetic and mechanical properties of the pellets produced were determined. The chlorine content of the wood appeared to international standards. Pellets with 80% of eucalyptus and 20% of pine have stood out for densities, compaction rates and mechanical properties. No. 1, the amount of kraft lignin in the properties of the pellets produced. It was used to compose the treatments 50% of eucalyptus and 50% of pine. In the production of pellets were 1, 2 and 4% of kraft lignin, in relation to the dry mass of the raw material. The pellets were made of horizontal circular horizontal films. A characterization of the mixture of biomass and the lignin used was carried out. They were evaluated as properties of the pellets as moisture, upper heat power, length and diameter, grain and unit density, energy and mineral density, ash content, fines content, mechanics and heavy hardness. It is concluded that the addition of lignin for the production of pellets is feasible, especially when it is desired to improve the mechanical characteristics of this biofuel.

Keywords: Renewable energy. Biomass compaction. Additive.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A questão energética assume, nos dias atuais, enorme importância, pois o aumento do consumo energético coloca em questionamento as fontes esgotáveis e poluidoras (derivados do petróleo). O uso de novas fontes requer que estas sejam capazes de substituir as atuais fontes primárias e, ao mesmo tempo, sejam limpas e menos poluidoras.

A utilização da biomassa vegetal como fonte de energia renovável é promissora nos cenários atual e futuro (BLANDY, 2016), devido a sua versatilidade e disponibilidade. Assim, a substituição de combustíveis fósseis por biomassa é considerada uma abordagem viável e que vem aumentando a demanda por biomassa para conversão energética (CHUM et al., 2011).

No entanto, o uso tradicional da biomassa, na forma bruta, é bastante ineficiente gerando desperdício de energia útil e, frequentemente, está associado a significantes impactos negativos ao meio ambiente. Por isso, as aplicações modernas como o uso de *pellets*, estão rapidamente substituindo o uso tradicional, sobretudo em países industrializados, pois exigem capital, conhecimento, tecnologia, estrutura de mercado e um determinado nível de desenvolvimento, que estão faltando na maioria das áreas rurais dos países em desenvolvimento, segundo Rosillo-Calle et al. (2007).

No processo de combustão, a biomassa pode ser utilizada in natura ou compactada, pela densificação ou aglomeração da biomassa, na forma de *pellets*. Os *pellets* são produzidos a partir de biomassa particulada sob alta pressão, com ou sem adição de ligantes, apresentando uma forma cilíndrica e comprimentos e diâmetros variáveis (NUNES et al., 2014). O uso dos *pellets* apresenta inúmeras vantagens como alto valor energético, facilidade de manuseio, transporte e armazenamento, entre outras.

Em geral, a produção de *pellets* promove a conversão de recursos lenhosos em produto uniforme com propriedades de combustão superiores, melhor desempenho em termos de manuseio, transporte e armazenamento (RUIZ et al., 2018).

A crescente demanda por bioenergia, impulsionada por metas e políticas de energia renovável, principalmente na Europa, provocou explosão na produção de *pellets* de madeira, com aumento de dez vezes à produção na última década (FAO, 2016). O consumo mundial de *pellets* passou de quantidades insignificantes no início dos anos 2000 para mais de 25 milhões de toneladas em 2014 (ARSENAULT, 2014).

É nesta perspectiva que países com disponibilidade de terras agricultáveis, setor florestal consolidado e clima tropical, podem passar a competir nesse mercado em expansão,

ainda que geograficamente mais distantes da Europa do que os Estados Unidos e o Canadá, principais exportadores de *pellets* fora da comunidade Europeia. Os custos mais baixos da biomassa madeireira e o aproveitamento de resíduos agrícolas, agroindústrias e florestais são as principais vantagens comparativas desses potenciais exportadores de biocombustíveis sólidos adensados. Dentre esses países com condições sabidamente favoráveis para a produção de *pellets* está o Brasil (TAVARES e TAVARES, 2015).

Segundo o IBÁ (2017), o Brasil totalizou em 2016 uma área de floresta plantada de 7,84 milhões de hectares. Com destaque para os plantios de eucalipto, que ocupam 5,7 milhões de hectares, seguido dos plantios de pinus com 1,6 milhões de hectares.

Além de otimizar os parâmetros operacionais, as propriedades físicas dos *pellets* podem ser efetivamente melhoradas pela adição de ligantes à matéria-prima (LAM et al., 2011). Vários são os tipos de ligantes que podem ser utilizados. A lignina kraft, obtida do aproveitamento do licor negro, resíduo da produção de polpa celulósica, pode ser utilizada como aditivo para *pellets* e contribuir também para a melhoria das propriedades mecânicas e energéticas dos mesmos.

No entanto, ainda existem inúmeros desafios que devem ser superados para melhorar a qualidade dos *pellets* produzidos no Brasil. Um dos desafios é a dificuldade de processar e peletizar diferentes resíduos lignocelulósicos, bem como a mistura de materiais residuais (LIU et al., 2016). Assim, como a produção de *pellets* no Brasil, que ainda ocorre de forma desestruturada, sem qualquer padronização ou normatização, uma vez que o país não possui máquinas peletizadoras adequadas e nem normas oficiais para a produção de *pellets* de madeira (GARCIA, 2010; NONES, 2014).

Desta forma, o objetivo geral deste estudo foi avaliar a qualidade de *pellets* produzidos com diferentes proporções de misturas de partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., além de verificar o efeito da adição de lignina kraft nas propriedades dos *pellets* produzidos.

Desta forma, a dissertação foi estruturada em dois artigos, conforme apresentados a seguir:

- **Artigo I:** Propriedades da matéria-prima e de *pellets* produzidos com misturas de madeiras de reflorestamento.
- **Artigo II:** Influência da adição de lignina kraft nas propriedades de *pellets* produzidos a partir de mistura de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Biomassa para produção de energia

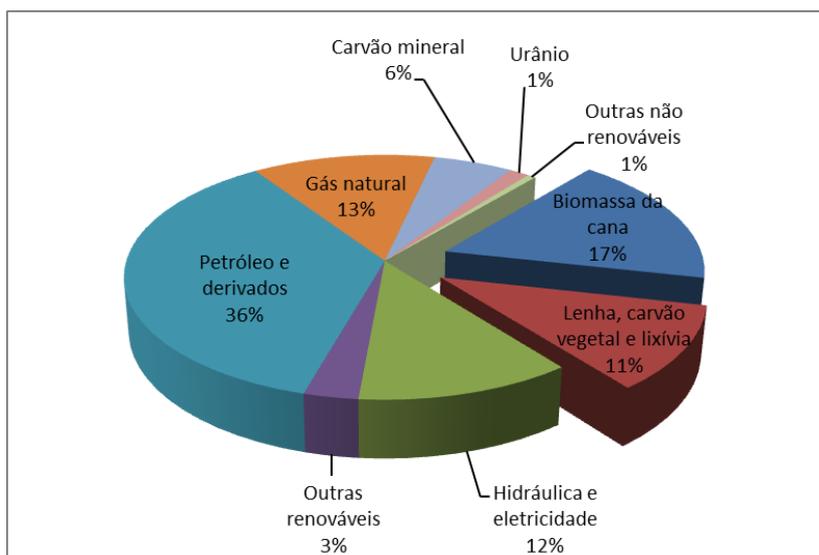
A utilização de energia da biomassa tornou-se uma questão importante e urgente, devido ao esgotamento dos combustíveis fósseis e à piora dos problemas ambientais, como à emissão dos gases de efeito estufa (LECKNER, 2007; YOUSAF et al., 2017). Nesse sentido, a biomassa vegetal vem se fortalecendo neste novo cenário energético mundial, pois, dentre as fontes renováveis de energia, possui grande potencial para suprir as necessidades atuais de energia a preços cada vez mais competitivos e com menor impacto ambiental (VERDESIO, 2008).

A bioenergia provida pela biomassa pode ser utilizada para produzir calor, eletricidade ou combustíveis para transporte. É responsável por aproximadamente 11% do suprimento total de energia primária do mundo. O suprimento moderno de bioenergia é importante no setor de aquecimento, no qual a biomassa é a maior fonte de calor renovável. Em 2015, no setor de aquecimento, o consumo de bioenergia (principalmente biomassa sólida) foi de 13,0 exajoule (EJ), o que representa cerca de 6% do consumo global de calor. No que diz respeito à produção de eletricidade, a produção global total de bioeletricidade foi de 474 terawatt-hora (1,7 EJ) em 2015, o que representa aproximadamente 2% da produção mundial de eletricidade. Em 2015, os biocombustíveis proporcionaram 4% da demanda mundial de combustíveis para transporte rodoviário (WBA, 2016).

De acordo com a ANEEL (2008) a biomassa é uma das mais promissoras fontes para produção de energia limpa, com grande potencial de crescimento no Brasil nos próximos anos. Quando comparada aos combustíveis fósseis, a biomassa é capaz de produzir energia de maneira sustentável e eficiente, pois possui flexibilidade que possibilite o fornecimento de matéria-prima para produzir energia elétrica e biocombustíveis utilizados nos meios de transporte (CORTEZ et al., 2008)

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2018), ano base 2017, a biomassa representou 28% da oferta interna de energia primária utilizada no país. A biomassa da cana-de-açúcar representou 17,0% do total, a madeira e seus derivados (lenha, carvão vegetal e lixívia) 11,0%, e as demais biomassas 0,4%, incluída em outras renováveis, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Oferta interna de energia primária no Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora, com base em (BEN, 2018).

O Brasil tem posição de destaque quando comparado a outros países, devido à grande disponibilidade de matérias-primas renováveis. Além disso, os setores florestal e agrícola brasileiro são caracterizados pela alta geração de resíduos que podem ser utilizados para geração de energia (DIAS et al., 2012).

Cita-se como fontes de biomassa vegetal, produtos e subprodutos de plantios florestais, resíduos da indústria madeireira, culturas e resíduos agrícolas, entre outros. Porém, a baixa densidade, elevada umidade e heterogeneidade de tamanho e forma dificultam a manipulação, transporte, armazenamento e utilização da biomassa *in natura* (KALIYAN; MOREY, 2009; TUMULURU et al., 2011; ZAMORANO et al., 2011). No entanto, a madeira é a matéria-prima mais utilizada para a produção de *pellets* (GILLESPIE et al., 2013), principalmente pela porcentagem e composição das cinzas favoráveis ao uso energético.

Das formas de se utilizar a biomassa florestal como fonte de energia, a compactação por meio da peletização proporciona muitas vantagens principalmente quanto ao armazenamento e transporte. A utilização de madeiras densificadas na forma de *pellets* resulta em valorização energética, aumento da eficiência econômica e ambiental do processo produtivo e contribui para a consolidação da matriz energética limpa e ambientalmente adequada.

2.2 Pellets

Pellets são biocombustíveis sólidos granulados produzidos a partir da densificação de partículas de biomassa, com ou sem aditivos, de formato cilíndrico, diâmetro de 6 a 25 mm e comprimento variável (Deutsches Institut Für Normung, 2011). Sua geometria regular e cilíndrica permite boa fluidez, comportando-se como líquido o que facilita automatizar processos comerciais e industriais de queima do produto. Além disso, é um produto natural de fácil manuseio, ocupa pouco espaço na estocagem e tem elevada densidade energética (GARCIA et al., 2013).

O uso do *pellet* é dito neutro em carbono, ou seja, todo CO₂ emitido na sua queima é recuperado no crescimento da árvore, e tem baixas emissões de gases do efeito estufa (COUTO et al., 2004). Além disso, o uso de *pellets* de madeira gera mais empregos locais do que a combustão direta de biomassa lenhosa (NISHIGUCHI e TABATA, 2016).

Além disso, a maioria das emissões da combustão de *pellets* é menor do que a combustão de toras de madeira (OZGEN et al., 2014; FACHINGER et al., 2017) porque, no caso de toras de madeira, parâmetros como espécies de madeira e a umidade pode desfavorecer o processo de combustão e gerar grandes quantidades de produtos da combustão incompleta.

Sikkema et al. (2010) mostraram que 12,6 milhões de toneladas de emissões de CO₂ equivalente foram evitadas com a utilização de 8,2 milhões de toneladas de *pellets* de madeira em 2008 na União Europeia, juntamente com a Noruega e a Suíça.

A União Europeia declarou que os biocombustíveis são neutros em carbono para ajudar a atingir sua meta de energia renovável até 2030, provocando um aumento no uso de madeira para aquecimento e eletricidade (STUPAK et al., 2007; LETURCQ, 2014; EU, 2016).

Assim, a produção de *pellets* desempenha papel crucial no desenvolvimento da bioenergia, uma vez que a biomassa é um material variável e complexo com desafios consideráveis quando utilizada diretamente para a produção de energia. A biomassa sólida refinada exibe alta capacidade de fluxo em vários sistemas e processos de manuseio, sua densidade de energia é inúmeras vezes maior que a biomassa bruta não tratada (DAHLQUIST, 2013).

O uso dos *pellets* proporciona muitas vantagens quando comparado ao uso da madeira *in natura*, principalmente no tocante ao armazenamento, manuseio, aumento da densidade, poder calorífico, facilidade de transporte, uniformização do material e redução substancial da ação poluidora. A ação poluidora é reduzida principalmente pela minimização na produção de fumaça e pelo maior controle da combustão nos equipamentos de aquecimento disponíveis no

mercado, proporcionando assim maior eficiência de queima com menor emissão de monóxido de carbono (LOUÇÃO, 2008).

Os *pellets* de madeira podem ser usados em fornos de *pellets*, caldeiras, fornos em usinas de energia e/ou combinada de calor e energia, bem como em casas particulares. Dependendo da aplicação, os *pellets* podem ser usados na forma de combustível residencial ou *pellets* industriais (PROSKURINA et al., 2015). Algumas das vantagens para quem compra biocombustíveis sólidos adensados, como os *pellets* são: menor preço relativo, maior energia concentrada num mesmo espaço ocupado por lenha, por exemplo, uniformidade de temperatura e pressão de vapor, proporcionando melhor acabamento aos produtos cozidos nos fornos, elevação rápida da temperatura, contribuindo para maior eficiência nos processos produtivos, redução de mão-de-obra para carga e descarga, a padronização dos tamanhos permitindo melhor aproveitamento dos espaços tanto para transporte quanto para armazenamento, facilitando inclusive a acomodação do produto em containers para exportação (TAVARES e TAVARES, 2015).

A utilização de *pellets* de madeira para produção de eletricidade em plantas dedicadas à bioenergia ou de co-incineração em usinas movidas a combustíveis fósseis existentes, tem demonstrado ser uma solução relativamente econômica e tecnicamente simples para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (CHUM et al., 2011; EHRIG e BEHRENDT, 2013; ZHANG et al., 2010).

A produção e o consumo de *pellets* estão concentrados na América do Norte e Europa. Países como Alemanha, Itália e Áustria, bem como os países da América do Norte, têm suas demandas focadas no aquecimento residencial (FAO, 2016).

A durabilidade mecânica é o principal parâmetro utilizado para descrever a qualidade física de biocombustíveis sólidos densificados como os *pellets* (CARROLL e FINNAN, 2012). É questão importante para o manuseio em sistemas de transporte aéreo, controle de poeira e segurança contra incêndio. Portanto, alta durabilidade se traduz em condições de armazenamento e transporte mais seguras, conforme documentado por Thrän et al. (2016).

2.3 Processo de produção de *pellets* de madeira

Peletização é o processo em que a biomassa na forma de partículas finas é comprimida interfacialmente sob alta pressão para sua densificação. O processo oferece vários benefícios, como o aumento da densidade energética do biocombustível, tornando

a combustão mais eficiente, a redução dos custos de manuseio, armazenamento e transporte do biocombustível e melhora da qualidade, estabilidade e durabilidade da biomassa em geral (SAIDUR et al., 2011).

O processo de peletização é baseado em série típica de etapas: a recepção da matéria prima, secagem, moagem, condicionamento, peletização, resfriamento, triagem e empacotamento, podendo variar dependendo da condição da matéria-prima (PEKSA-BLANCHARD et al., 2007).

A produção de *pellets* de madeira começa com a geração da matéria-prima, que por sua vez, deve ter baixo teor de umidade para que tenha alto poder calorífico. Para a secagem uniforme deste material são utilizados secadores rotativos que conseguem teores abaixo de 10% (base seca).

A moagem da biomassa é realizada em moinhos para a padronização das partículas. Estudos realizados por Mani et al. (2006) mostraram relação entre o tamanho uniforme das partículas e a qualidade dos *pellets*, no entanto, Shaw (2008) relatou que são necessárias partículas finas e médias para a melhor compactação do biocombustível.

A compactação da biomassa ocorre via “extrusão” da madeira por meio de uma matriz perfurada de aço ou peletizadora. A peletização da madeira emprega uma matriz com um denso arranjo de orifícios de 3,0 a 13,0 mm de diâmetro que gira e a pressão interna dos cilindros força a passagem das partículas de madeira pelos orifícios com pressão em torno de 300MPa e temperatura aproximada de 120°C (NIELSEN et al., 2009). A pressão exercida entre os componentes, segundo Lethikangas (2001), causa uma força de fricção que aquece e pressiona o material através das perfurações da matriz. A coesão que ocorre internamente entre partículas é causada pelo calor gerado pela compressão. Salienta-se que os mecanismos de ligação entre as partículas de madeira são principalmente devido à lignina, componente químico da madeira que atua como um agente de ligação natural entre as partículas durante a peletização (KALIYAN; MOREY, 2009).

O condicionamento a vapor das partículas antecedendo o processo de peletização, ativa alguns dos agentes de ligação básica da biomassa, como amido de proteína e lignina, que podem ajudar a se ligar com menos energia (TUMULURU, 2011).

Ao final da etapa de peletização, o combustível sai com temperatura em torno de 95°C. Há necessidade de algumas horas para o resfriamento e estabilização da lignina, (internamente), antes dos processos de triagem e empacotamento.

Em geral, a qualidade dos *pellets* depende das propriedades da matéria-prima e do gerenciamento da qualidade do processo de fabricação. As variáveis dependentes do processo

de peletização, fontes de matéria-prima, tamanho de partícula, umidade, temperatura da biomassa, taxa de alimentação da biomassa, tamanho e forma da matriz, velocidade de compactação e temperatura da matriz, podem ser controladas para melhorar ao máximo a eficiência da produção e melhorar a qualidade do produto de acordo com a biomassa utilizada (BISSEN, 2009; CARONE et al., 2011). O desafio da peletização da biomassa é, portanto, manter esses parâmetros na faixa de produção de *pellets* de alta qualidade, com consumo mínimo de energia e alta capacidade de peletização (STELTE et al., 2011).

Vários fatores interferem na qualidade e dificuldade da produção dos *pellets*, como a utilização ou não de vaporização e pré-aquecimento das partículas e os fatores relacionados à peletizadora, como pressão, velocidade dos roletes, dimensões dos canais de compressão e a matriz de compressão (TUMULURU, 2014).

Para exemplificar a complexidade do processo de peletização, Larsson et al. (2007), produzindo *pellets* com 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.

2.3.1 Adição de Lignina Kraft

Alguns aditivos são frequentemente adicionados no processo de peletização para garantir que os *pellets* possam cumprir alguns padrões comerciais (BERGHEL et al., 2013; KUOKKANEN et al., 2011). Aditivo é qualquer material que melhora a qualidade do combustível, por exemplo, nas propriedades de combustão, redução das emissões ou proporciona produção mais eficiente (European Pellet Council - EPC, 2015).

A lignina, que é um dos principais constituintes da biomassa, é o principal componente que atua como aglutinante durante a peletização e é essencial para obtenção de *pellets* de boa qualidade (STELTE et al., 2011). Portanto, maiores teores de lignina são desejados. A lignina funciona como agente de ligação natural durante a peletização (KALIYAN; MOREY, 2010; CARROLL e FINNAN, 2012), contribuindo para as

propriedades mecânicas. Além disso, maiores teores de lignina contribuem para o aumento do poder calorífico superior do combustível (DEMIRBAS, 2001; 2002).

A utilização de lignina kraft como aditivo à matéria-prima para produção de *pellets* é promissora. Contudo, há poucos trabalhos relacionados ao tema (BERGHEL et al., 2013; PEREIRA et al. 2016). A lignina kraft é obtida do licor negro de fábricas de polpa celulósica pelo processo Kraft e a separação e purificação podem ser feitas por diversos processos industriais. As propriedades da lignina kraft são específicas do processo de extração e irão afetar positiva ou negativamente as propriedades dos *pellets* (BERGHEL et al., 2013).

Devido às temperaturas alcançadas durante a peletização, em torno de 100°C, a lignina é plasticizada e funciona como agente de ligação entre as partículas (KALIYAN; MOREY, 2010; CARROLL e FINNAN, 2012). Segundo Narra et al., (2010), a lignina forma uma fina camada sobre as partículas, o que contribui para melhorar a ligação entre elas. Isto porque há interdifusão molecular e entrelaçamento entre cadeias adjacentes, fenômeno descrito como ponte sólida por Kaliyan e Morey (2010), ou seja, há formação de uma rede de macromoléculas que se fundem e posteriormente, solidificam-se (STELTE et al., 2012).

Com o aumento da temperatura, a energia das moléculas de lignina aumenta, ligações intermoleculares são enfraquecidas e ocorrem rotações em torno das ligações covalentes, o que torna a lignina flexível, passando do estado vítreo para plástico (KALIYAN; MOREY, 2010; STELTE et al., 2011b). A temperatura em que este fenômeno ocorre denomina-se temperatura de transição vítrea e depende da composição da lignina e da presença de um agente plasticizante, como a água, e varia de 50 a 100°C (STELTE et al., 2011b).

A umidade da matéria-prima, as temperaturas elevadas e a pressão no processo de compactação contribuem para o aumento da fluidez da lignina, elevando a área de contato e a possibilidade de interpenetração de moléculas de lignina entre duas partículas (STELTE et al., 2012). Portanto, pressionando-se a madeira acima da temperatura de transição vítrea, as propriedades mecânicas dos *pellets* são melhoradas. Dessa forma, assim como a lignina presente na madeira in natura, a lignina kraft também pode contribuir para melhorar a aglutinação das partículas que compõe os *pellets*.

2.4 Mercado de *Pellets*

2.4.1 Mundial

Em muitos países, o potencial interno de biomassa e a produção de *pellets* de madeira são insuficientes para satisfazer as necessidades energéticas do país, assim o aspecto fundamental do negócio de *pellets* de madeira tornou-se o comércio internacional (PROSKURINA et al., 2014).

O mercado de *pellets* de madeira é um dos mercados de biocombustível sólido que mais se desenvolve dinamicamente no setor de energia (PROSKURINA et al., 2015; 2016; 2017). Com o rápido crescimento do mercado, a aplicação de *pellets* de biomassa está se tornando cada vez mais ampla, sendo a maioria dos *pellets* produzidos a partir de madeira (STRAUSS, 2017).

Os *pellets* de madeira são comercializados internacionalmente, com grandes fluxos comerciais da América do Norte e Rússia para a Europa, que atualmente é o principal consumidor de *pellets* de madeira. O alto consumo de *pellets* de madeira e as importações significativas na União Europeia podem ser explicados por razões históricas. O uso de *pellets* de madeira começou na Suécia, por tendências de desenvolvimento da energia renovável, por apoio político e questões ambientais ligadas a meta europeia de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa. Diferentes cenários sugerem que os mercados europeus de *pellets* de madeira crescerão ainda mais (SIKKEMA et al., 2011; LAMERS et al., 2012).

Entre 2012 e 2014, as exportações de *pellets* de madeira dos Estados Unidos foram enviadas principalmente para o Reino Unido (73%), seguido pela Bélgica (12%), Holanda (7%) e Europa (6%). Das importações para o Reino Unido, 82% foi para o Grupo Drax, maior fornecedor de eletricidade do Reino Unido (ELIA, 2016). A Drax está adaptando suas centrais a carvão para co-incineradores de carvão e *pellets* de madeira, com o objetivo de futuramente converter as plantas industriais para queima dedicada de biomassa a fim de utilizar a infraestrutura existente (LOWENTHAL-SAVY, 2015). Atualmente 70% na energia gerada pela Drax provêm de biomassa na forma de *pellets*. Para atender à demanda de biocombustível sólido somente para a Drax, serão necessários 2,3 milhões de toneladas de *pellets* ao ano.

A produção global de *pellets* alcançou 26,2 milhões de toneladas em 2014, aumento de quase 15% em relação aos volumes de 2013. Em 2015, a produção global de *pellets* subiu para 28 milhões de toneladas. Isso representa aumento de 8% em relação ao nível do ano anterior e aumento de 42% em relação as 20 milhões de toneladas produzidas em 2012. (REN21, 2015; FAO, 2016).

A produção de *pellets* de madeira aumentou drasticamente nos últimos anos para atender às metas de bioenergia estabelecidas pela União Europeia. Em 2016, a produção global cresceu 6%, chegando a 29 milhões de toneladas, mais da metade das quais

comercializadas internacionalmente. A Europa e a América do Norte responderam por quase toda a produção global de 58% e 32%, respectivamente, e consumo de 81% e 8%, respectivamente (FAO, 2017).

As importações de *pellets* de madeira também aumentaram no Japão e na China (FAO, 2017). Nos próximos anos, Austrália, Moçambique, África do Sul e vários países sul-americanos deverão tornar-se exportadores de *pellets* (COCCHI et al., 2011).

Os principais produtores de *pellets* de madeira, Estados Unidos, Canadá e União Europeia, produziram mais de 14 milhões de toneladas de *pellets* de madeira em 2015. O consumo de *pellets* de madeira foi de cerca de 20 milhões de toneladas na União Europeia (THRÄN et al., 2017).

O uso de *pellets* pelo setor industrial destaca-se em países cuja produção de energia elétrica baseia-se na queima de biomassa, como o caso da Suécia, Dinamarca, Holanda, Bélgica e Reino Unido (FLACH et al., 2013). O Reino Unido subsidia *pellets* de madeira para geração de energia elétrica e se tornou o maior importador do mundo (THRÄN et al., 2017).

A produção de *pellets* de madeira e as exportações do sudeste dos EUA cresceram substancialmente desde o início dos anos 2000 e, em 2015, 98% desses *pellets* foram enviadas para a União Europeia (UE) para bioenergia (US International Trade Commission 2016, Dale et al., 2017). O principal motivador da política de aumento da demanda por *pellets* é a Diretiva de Energia Renovável (RED) da UE (ABT et al., 2014). Com base na RED, a demanda por *pellets* aumentará significativamente na próxima década e é altamente provável que a biomassa importada do sudeste dos EUA e do Canadá domine as fontes não-europeias no futuro (LAMERS et al., 2014).

Estudos preveem o consumo de 50 milhões de toneladas de *pellets* para 2024, o que representa mais de três vezes o consumo atual. Esse combustível já é considerado um dos maiores produtos de biomassa sólida comercializados internacionalmente, segundo a Associação Europeia de Biomassa (AEBIOM, 2015).

2.4.2 Mercado Brasileiro

Após os *pellets* terem se tornado commodities comercializadas em todo o mundo (PROSKURINA et al., 2016), o Brasil foi apontado como um dos principais atores desse segmento de biomassa agroflorestal, aumentando a necessidade de dados mais confiáveis e precisos sobre o mercado de *pellets* local.

Em análise da produção global de resíduos da indústria madeireira, realizados por Dolzan et al. (2006) já indicava o Brasil como um dos cinco países, ao lado dos Estados Unidos, Canadá, China e Rússia, com grande potencial de crescimento na produção de biocombustível a partir dos subprodutos gerados nas empresas de base florestal. Porém, diferente do contexto de mercado bem consolidado encontrado no mundo, os *pellets* para uso energético são pouco conhecidos e utilizados no Brasil.

As plantas industriais de *pellets* existentes no Brasil são relativamente jovens, foram criadas a partir de 2004 e 69% delas surgiram depois de 2012. De acordo com as informações levantadas, todas as empresas utilizam resíduos de *Pinus* sp. (na forma de serragem, pó de serra ou maravalha) das indústrias madeireiras como principal matéria-prima do processo de peletização (GARCIA et al., 2017). No entanto, o uso exclusivo da biomassa residual inviabiliza a escala produtiva, por fatores como a descentralização dos resíduos, a falta de incentivos fiscais específicos para a produção de biomassa para fins energéticos (ESCOBAR, 2016).

Estima-se que a produção de *pellets* cresceu 4,0% ao ano no Brasil, de 2004 a 2014, e poderia ser maior, dada a quantidade de resíduos agroflorestais ainda não comercializados que poderiam ser transformados em biocombustíveis sólidos, como *pellets* (DIAS et al., 2012).

A produção brasileira de *pellets* no ano de 2010 foi de 47 mil toneladas, destinada ao mercado externo (Associação Brasileira De Produtores De Florestas Plantadas - ABRAF, 2013).

O Brasil produziu 49.390 e 75.000 toneladas em 2014 e 2015, respectivamente (GARCIA et al., 2016; 2017), mas tem capacidade produtiva instalada para produzir quatro vezes mais (GARCIA et al., 2016).

Em 2015, o mercado interno brasileiro consumiu 57.698 toneladas de *pellets*, representando 76,93% da produção total do país. As principais aplicações são para a geração de energia térmica nas áreas comerciais e industriais, como o aquecimento de aviário, hotéis, pizzarias e padarias (GARCIA et al., 2017).

No Brasil o custo de produção por tonelada de *pellets* de madeira de uma fábrica padrão está em torno de R\$ 380,00 o qual equivale a 50% da capacidade instalada - operação e manutenção, e 50% na aquisição da biomassa residual (ESCOBAR, 2016).

Existem atualmente no Brasil apenas 13 fábricas de *pellets* operando, com produção total de 75.000 ton.ano⁻¹, utilizando somente 37% do total da capacidade instalada de 200.750 ton.ano⁻¹ (GARCIA et al., 2016).

Vários fatores dificultam a expansão da produção e consumo de *pellets* no país. De acordo com Gentil (2008) a falta de normatização, quanto a suas características físicas e químicas, representa um dos entraves para o crescimento desses biocombustíveis no Brasil, uma vez que para o mercado em formação a qualidade do produto é fundamental. Outro fator que tem dificultado o avanço da produção, é que os consumidores em potencial dos *pellets* no Brasil praticamente não conhecem o produto e os que conhecem, ainda, não confiam na sua qualidade, o que remete novamente a falta de normatização. Uma das razões para essa baixa aceitação é a falta de padronização e de formação de um mercado local (OLIVEIRA, 2012).

A dependência de importação de máquinas peletizadoras também é classificada como entrave para a consolidação do negócio de *pellets* no país. Ao contrário das briquetadoras nacionais, as peletizadoras produzidas aqui não conseguem processar a enorme gama de resíduos agrícolas e madeireiros que chegam às fábricas. As peletizadoras nacionais são adaptações de máquinas para fabricação de ração animal, sem a resistência nem a robustez necessárias para a produção de *pellets* energéticos (TAVARES e TAVARES, 2015).

Outros problemas apontados pelos produtores de *pellets* no Brasil são: a falta de uma política nacional de incentivo ao uso dos resíduos florestais e agrícolas para geração de energia e os altos custos do transporte da matéria-prima para a fábrica e, desta, para o mercado consumidor, seja ele interno ou externo (SERRANO, 2009).

No sentido de tentar mitigar esses entraves, o Serviço Florestal Brasileiro do Ministério do Meio Ambiente (SFB/MMA) tem trabalhado à frente do principal movimento para normatização de *pellets* no Brasil, que propõe diferentes classes de qualidade para estes produtos, baseado no teor de cinzas, utilização (industrial ou doméstica), origem dos resíduos e processo de fabricação de cada um deles. Apesar de ser um primeiro passo, trata-se ainda de uma proposta que está muito aquém do exigido pelo mercado externo (DIAS et al., 2012). A Câmara do Senado Federal também tem buscado promover o uso dos *pellets* no Brasil, em 2017, foi publicado o Texto para Discussão N° 235 intitulado “*Pellets* de madeira como uma alternativa para a geração termelétrica no Brasil” (CUPERTINO, 2017).

Novas fábricas de *pellets*, com grandes capacidades de produção, como a Tanac (*pellets* de Acácia Negra), cuja produção deverá ser voltada para atender ao Grupo Drax, a Cosan (*pellets* de bagaço de cana-de-açúcar) e a Forespel (*pellets* de madeira de Pinus), devem impulsionar o mercado de *pellets* no Brasil.

Espera-se que em 2019 a produção seja de 900 mil ton.ano⁻¹, e em 2022 atinja a capacidade máxima de produção. A Tanac, localizada em Rio Grande (RS), possui um

financiamento inicial de US\$ 60 milhões e uma produção atual de 400 mil toneladas (HICKMANN, 2017).

2.5 Normatização dos *pellets* para comercialização

Segundo Dias et al. (2012) o mercado Europeu se destaca na normatização de *pellets*, com o intuito de garantir a uniformidade do produto, visando o benefício de seus consumidores. Inicialmente, essas normas foram elaboradas e implantadas isoladamente em países como Áustria, Alemanha e Suécia, porém o estabelecimento de normas individualmente acarretou diferenças significativas em diversos parâmetros de qualidade.

Algumas das normas para a comercialização de *pellets* são ÖNORM M 7135 (Áustria), DIN 51731 (Alemanha), DIN EN 14961 (Alemanha), SN 166000 (Suíça), SS 187120 (Suécia) e normas da Austrian *Pellets* Association (OBERNBERGER e THEK, 2010).

O elevado número de normas existentes na Europa dificultou o atendimento dos requisitos exigidos aos países exportadores que visavam ao mercado europeu, com isso desde 1995 a União Europeia por meio do Comitê Europeu de Normalização (CEN) promoveu um movimento para uniformização das normas em todo o continente, em que estabeleceu todas as formas e propriedades relevantes aos combustíveis sólidos.

A padronização da quantidade de finos, a durabilidade e a resistência mecânica são as principais questões que devem ser resolvidas para facilitar o livre comércio nestes países (GARCIA, 2013), seguido pelos compostos mais controlados, que são os teores de cloro e enxofre, pela formação de gases mutagênicos como dioxinas e furanos, e, o teor de cinzas, por ser abrasivo e prejudicial ao processo termodinâmico (ESCOBAR, 2016).

A história da certificação de *pellets* de madeira está intimamente ligada à história da commodity que ela certifica. *Pellets* de madeira surgiram durante a crise do petróleo na década de 1970, no entanto, foi só na década de 1990, em meio as crescentes preocupações sobre o meio ambiente, que os *pellets* de madeira começaram a ser vistos como fonte de energia alternativa confiável na Europa. Desde então, a produção e o consumo continuaram crescendo de forma constante, sendo atualmente considerados como um combustível renovável premium (EN plus, 2018).

Neste contexto, a certificação EN plus® foi estabelecida em 2011, inicialmente projetada pela Deutsches Pelletinstitut, em que estabelece rigorosos limites em toda cadeia de

fornecimento e produção de *pellets*, desde o processo de peletização até a entrega final ao cliente, promovendo assim uma qualidade superior. A propriedade da marca ENplus® é da Associação Europeia de Biomassa (AEBIOM), que é integrada também pelo Conselho de *Pellet* Europeu (EPC). Com uma projeção de 10 milhões de toneladas de *pellets* certificadas produzidas em 2018, a EN plus® é hoje o mais importante programa de certificação de qualidade de *pellets* de madeira, produzido e comercializado por quase 900 empresas de mais de 45 países.

Devido à necessidade de internacionalização, não só da certificação, mas também dos padrões de qualidade, criou-se em 2014 o conjunto de normas internacionais ISO 17225, partes de 1 a 8.

A EN ISO 17225-1: 2014 se referi aos requisitos gerais e classifica a biomassa sólida com base na origem e fonte do biocombustível, e fornece especificações sobre as formas e propriedades comercializadas da biomassa sólida. A indicação da fonte e origem é obrigatória para todos os biocombustíveis sólidos (ALAKANGAS, 2015).

A norma EN ISO 17225-2 estabelece uma séries de normas internacionais a serem utilizadas no controle de qualidade de *pellets* de madeira que recebem certificação ENplus® (RANGEL et al., 2018). Tal norma inclui *pellets* para uso industrial e não industrial. Utilização não industrial significa combustível destinado a ser utilizado em queimadores de menor dimensão, como os encontrados em residências e pequenos edifícios comerciais e do setor público, classificados como *pellets* de qualidade A1, A2 e B. A classe de propriedade A1, cujo selo de qualidade é exemplificado na Figura 2, é composta por *pellets* de madeira virgem, resíduos de madeira não tratados quimicamente e com baixo teor de cinzas e nitrogênio.

Figura 2 – Exemplo do selo de qualidade para *pellets* de madeira ENplus A1.



Fonte: European Pellet Council (2018).

Pellets com teor de cinzas e teor de nitrogênio um pouco maior se enquadram na classe de propriedade A2. Na classe de propriedade B, se enquadram os *pellets* de madeira provenientes de subprodutos e resíduos de madeira industrial, em que é permitido o uso de madeira tratada e não tratada quimicamente, contanto que os valores limiares para metais pesados não sejam atingidos. A norma também classifica os *pellets* de madeira de uso não industrial em classes I1, I2 e I3.

O teor de cinzas dos *pellets*, na norma ISO 17225 (2013), é um dos principais fatores analisados, porque influenciam diretamente na combustão, causam baixa eficiência do queimador, incrustações, corrosões e, conseqüentemente aumentam as despesas com manutenção do equipamento (GARCÍA et al., 2015). Juntamente com os teores de cloro, pela formação de gases mutagênicos como dioxinas e furanos (ESCOBAR, 2016).

Os requisitos de qualidade da ENplus® se baseiam na ISO 17225 – 2, se desvencilhando das normas europeias. O certificado ENplus® possui critérios que vão além dos exigidos pela ISO (RANGEL et al., 2018). A certificação ENplus® contribuiu muito para a promoção do mercado de *pellets* residenciais na Alemanha e, hoje, é o rótulo mais importante de qualidade para *pellets* de madeira de alta qualidade em todo o mundo (DIAS et al., 2012).

2.6 Matéria-prima: *Eucalyptus* sp e *Pinus* sp

A madeira é a matéria-prima mais utilizada para produção de *pellets* para fins energéticos no mundo. Fato que pode ser justificado pelas diversas desvantagens que os *pellets* agrícolas têm em comparação aos *pellets* florestais, tais como menor teor energético e maiores taxas de enxofre, nitrogênio, cloro e sílica, que após a combustão atuam como abrasivos corrosivos e mutagênicos (VISASPACE, 2011; WPAC, 2017).

De forma geral a biomassa brasileira, na sua maioria apresenta taxas de cloro (KEENE et.al., 1986; MELLO, 2001), o qual inviabiliza o enquadramento nas normas internacionais, devido à formação de dioxinas em função do cloro, que representa a problemática central do uso da biomassa brasileira no mercado mundial de *pellets*.

O teor de cinzas é considerado bom parâmetro para uma avaliação da qualidade de biomassa para produção de *pellets* (SCATOLINO et al., 2018).

A escolha da matéria-prima está relacionada à distribuição geográfica das empresas e à disponibilidade de biomassa próxima à planta industrial. O *Pinus* sp. como matéria-prima

para a produção de *pellets* é utilizado por 84,5% dos produtores brasileiros, e geralmente é subproduto das indústrias madeireiras da região onde a planta industrial está localizada (GARCIA et al., 2017). As regiões Sul e Sudeste, polo da produção de *pellets* no país, concentram 73% dos resíduos das indústrias de madeira processadas no Brasil (SCHNEIDER et al., 2012).

Os produtores preferem a madeira dessa conífera em função da grande disponibilidade destes resíduos vindos das indústrias madeireiras que fabricam móveis no Centro-Sul do Brasil e por se tratar de madeira macia (*softwood*) e de baixa densidade, ocasionando menos desgastes nos equipamentos de peletização (GARCIA et al., 2016).

Apesar de estarem perdendo terreno, resíduos de *Eucalyptus* sp. também foram citados como matéria-prima utilizada para a produção de *pellets*. No entanto, segundo os produtores, devido a sua maior densidade e dureza quando comparado ao *Pinus* sp., tornam o processo de compressão mais oneroso e mais lento, além de encurtar a vida útil do equipamento devido ao desgaste excessivo causado pelo atrito mecânico. O uso de equipamentos de peletização mais robustos, com fase de pré condicionamento com vapor superaquecido, tem sido utilizado para processar *Eucalyptus* sp. juntamente com outras biomassas. A mistura de 70% de *Pinus* sp. e 30% de *Eucalyptus* sp. consiste em outra solução prática que minimiza o desgaste e prolonga a vida útil da matriz de peletização (GARCIA et al., 2016).

Shaw (2008) observou que devido à taxa mais baixa de lignina nas folhosas, aditivos podem ser utilizados para funcionarem como elemento ligante e melhorar a qualidade do produto adensado.

Acredita-se que até 2020 toda capacidade de usina de peletização instalada será para uso apenas de biomassa lenhosa. Em 2030, 30% da capacidade adicional deverá ser de biomassa agrícola para peletização e 70% continuaria para a biomassa lenhosa (BIOTRADE2020, 2016).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABT, K. L.; ABT, R. C.; GALIK, C. S.; SKOG, K. E. Effect of policies on pellet production and forests in the U.S. South: a technical document supporting the Forest Service update of the 2010 RPA Assessment. Gen. Tech. Rep. SRS-202. U.S. **Department of Agriculture Forest Service**, Southern Research Station, Asheville, NC 33 p. 2014.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica** - 3ª ed., Brasília: 2008. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1687. Acesso em: 10 mai 2012.

ARSENAULT, J.W. **Les marchés européens et mondiaux**. Apresentação durante a Montreal Wood Convention 2014. Disponível em:

<http://www.quebecwoodexport.com/fr/evenements/307conferencegranules>. Acesso em: 24 ago 18.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS -ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013**. Brasília, 148 p. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D1762-84: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International. 2 p. 2007.

_____. ASTM E711-87: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia: ASTM International. 8 p. 2004.

AEBIOM – **European Biomass Association**. Disponível em: <http://www.aebiom.org/wp-content/uploads/2016/12/AEBIOM-KEY-FINDINGS-REPORT2016.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2018.

ALAKANGAS, E. **Graded Thermally and Densified Biomass Fuels: Development of the ISO 17225–8 Standard**. SECTOR Deliverable D8.3, 2015.

BEN – **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE, 2018.

BERGHEL, J; FRODESON, S; GRANSTRÖM, K; RENSTRÖM, R; STÅHL, M; NORDGREN, D; TOMANI, P. The effects of kraft lignin additives on wood fuel pellet quality, energy use and shelf life. **Fuel Processing Technology** 112, 64–69, 2013.

BIOTRADE2020PLUS. **Supporting a Sustainable European Bioenergy Trade Strategy**. Progress report on Wp 3 case studies Brazil, 2016.

BISSEN, D. Biomass densification document of evaluation. **Zachry Engineering Corporation**, Minneapolis, MN, USA, 2009.

BLANDY, R. Ambiente Energia. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2016/01/2016-sera-um-anomuito-promissor-para-o-sorgo-biomassa/27967>. Acesso em: 02 maio 2016.

CARONE, M. T.; PANTALEO, A.; PELLERANO, A. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. **Biomass and Bioenergy**, 35, pp. 402-410, 2011.

CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 2, p. 151-159, 2012.

CHUM, H.; FAAIJ, A.; MOREIRA, J.; BERNDES, G.; DHAMIJA, P.; DONG, H.; GABRIELLE, B.; GOSS ENG, A.; LUCHT, W.; MAPAKO, M.; MASERA CERUTTI, O.; MCINTYRE, T.;

MINOWA, T.; PINGOUD, K. **Bioenergy. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011.

COCCHI, M.; NIKOLAISEN, L.; JUNGINGER, M.; GOH, C. S.; HEINIMO, J.; BRADLEY, D.; HESS, R.; JACOBSON, J.; OVARD, L.; THRAN, D.; HENNIG, C.; DEUTMEYER, M.; SCHOUWENBERG, P.; MARCHAL, D. **Global Wood Pellet Industry Market and Trade Study.** IEA Bioenergy Task 40. 2011.

CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; AYARZA, J.A.C. **Biomassa no Brasil e no mundo.** In: CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. (org). “Biomassa para energia”. Campinas, São Paulo. Editora da UNICAMP, 2008.

CUPERTINO, S. A. Pellets de Madeira como uma Alternativa para a Geração Termelétrica no Brasil. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/ Senado, Junho/2017 (Texto para Discussão nº235). www.senado.leg.br/estudos. Acesso em: 22 mai. 2018.

DAHLQUIST, E. **Technologies for converting biomass to useful energy – combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation.** p. 345–355, 2013.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 2, p. 183-188, 2001.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy, Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 15210-1: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets.** Berlin: CEN, p. 12, 2010.

_____. **DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method.** Berlin: CEN, p. 10, 2010.

_____. **DIN EN 16127: Determination of length and diameter of pellets.** Berlin: CEN, p. 11, 2012.

DIAS, J. M. S. et al. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília, DF: **Embrapa Agroenergia**, 132 p., 2012.

DOLZAN, P, WALTER, A. **Brazilian Solid biofuels and the International Bio-energy Trade: Costs added by Logistic Barriers versus Market Prices.** 15°. European Biomass Congress and Exhibition – Berlin. 2006.

EHRIG, R; BEHRENDT, F. Co-firing of imported wood pellets - an option to efficiently save CO2 emissions in Europe? **Energy Policy** 59:283300. 2013.

ELIA. Minimum Price and Legal Frame, European Language Industry Association, Belgium’s Electricity Transmission System Operator, Products and Services, Green certificates. 2016. Disponível em: <http://www.elia.be/en/products-and-services/greencertificates/Minimumprice-legalframe>. Acesso em: 20 jun. 2018.

ENPLUS® - BIOENERGY EUROPE. Disponível em: <https://enplus-pellets.eu/en-in/about-us-en-in/history-of-enplus.html>. Acesso em: 05 jun. 2018.

EPC – EUROPEAN PELLET COUNCIL. Disponível em: <http://epc.aebiom.org/about-pellets/pellets-statistics/world-pellet-map/>. Acesso em: 25 jun. 2018.

EPC – EUROPEAN PELLET COUNCIL. Disponível em: https://enplus-pellets.eu/en-in/?option=com_attachments&task=download&id=103:ENplusHandbook_part3_V3. Acesso em: 20 mai. 2018

ESCOBAR, J. F. A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: o caso dos pellets de madeira. **Tese** (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

EU. Directive 2016/0382. DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Brussels, COM, 2016. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_en_act_part1_v7_1.pdf. Acesso: 04 jun 2018.

FACHINGER, F.; DREWNICK, F.; GIERÉ, R.; BORRMANN, S.. How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: emission factors for different fuels and burning conditions. **Atmos. Environ.**, 158, pp. 216-226, 2017.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global forest product facts and figures. 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i7034en/I7034EN.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2018.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Statistics Division. Forestry Production and Trade. 2017. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/download/F/FO/E>. Acesso em: 16 jun. 2018.

FLACH, B.; BENDZ, K.; KRAUTGARTNER, R.; LIEBERZ, S. **EU Biofuels Annual**. USDA, Foreign Agricultural Service, 34 p. 2013.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. **Caracterização energética de pellets de madeira**. Revista da Madeira, v. 135, n. 2, p. 14-18, 2013.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F.H.A. **Trends and challenges of origin Brazilian agroforestry pellets industry**. Cerne, v. 22, n. 3, p. 233-240, 2016.

GARCIA, D ; CARASCHI, J ; VENTORIM, G. **Decomposição térmica de pellets de madeira por TGA**. Holos, Vol.32(1), pp.327-339. 2016.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. **O setor de pellets de madeira no Brasil**. Revista Ciência da Madeira, v. 8, n. 1, p. 21-28, 2017.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; ÁLVAREZ, A.; LAVÍN, A G.; BUENO, J. L. Study of biomass combustion wastes. **Fuel**, v.148, p. 152-159, 2015.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2008.

GILLESPIE, G. D.; EVERARD, C. D.; FAWANGAN, C. C.; MCDONNELL, K. P. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. **Fuel**, v. 111, p. 771-777, 2013.

HICKMANN, C. Três fábricas de pellets impulsionam o mercado da madeira no Rio Grande do Sul. *Jornal do comércio*, Porto Alegre, v. 84, n. 239, p. 11, maio 2017.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. Relatório 2017, Brasília, 2017.

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

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 3, p. 1082-1090, 2010.

KEENE, W. C., A. A. P. PSZENNY, J. M. GALLOWAY, AND M. E. HAWLEY. Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation, *J. Geophys. Res.*, 91(D6), 6647-6658, 1986

KUOKKANEN, M.; VILPPO, T.; KUOKKANEN, T.; STOOR, T.; NIINIMAKI, J. Additives in wood pellet production - a pilot-scale study of binding agent usage. *Bioresources*, 6, pp. 4331-4355, 2011.

LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; LIM, C. J.; MELIN, S. Entrada de energia e qualidade de pellets feitos de abeto de Douglas explodido a vapor (*Pseudotsuga menziesii*). *Energy Fuels*, 25 (4) 1521 – 1528, 2011.

LAMERS, P.; JUNGINGER, M.; HAMELINCK, C.; FAAIJ, A. Developments in international solid biofuel trade—an analysis of volumes, policies, and market factors. *Renew Sustain Energy Rev.* 16(5), p. 3176–3199, 2012.

LAMERS, P.; JUNGINGER, M.; DYMOND, C.; FAAIJ, A. Damaged forests provide an opportunity to mitigate climate change. *GCB Bioenergy*, v. 6, p. 44–60, 2014.

LARSON, S. H.; THYREL, M.; GELADI, P.; LESTANDER, T.A. 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, 2007.

LECKNER, B. **Co-combustion - a summary of technology** *Therm. Sci.*, 11, pp. 5-40, 2007.

LIU, Z.; MI, B.; JIANG, Z.; FEI, B.; CAI, Z.; LIU, X. Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renew. Energy*. 86 , 1–7, 2016.

LOUÇÃO, I. J. G. **Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença de nemátodo de pinheiro, para produção de peletes**. 177 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

LOWENTHAL-SAVY, D. **UK’s renewable energy targets drive increases in U.S. wood pellet exports**, *US Energy Information Administration*. 2015. Disponível em: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=20912>. Acesso em: 18 mai. 2018.

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

MELLO, W. Z.; Precipitation chemistry in the coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Pollution*. V. 114, p. 235-242. 2001.

NARRA, S.; TAO, Y.; GLASER, C.; GUSOVIUS, H. J.; AY, P. Increasing the Calorific Value of Rye Straw Pellets with Biogenous and Fossil Fuel Additives. **Energy & Fuels**, v. 24, p. 5228-5234, 2010.

NIELSEN, N. P. K.; GARDNER, D. J.; POULSEN, T.; FELBY, C. Importance of Temperature, Moisture Content, and Species for the Conversion Process of Wood Residues into Fuel Pellets. **Wood and Fiber Science**, v. 41, n. 4, p. 414-425, 2009.

NISHIGUCHI, S.; TABATA, T. Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: direct burning and wood pellets. **Renew Sustain Energy**. Rev, 57, pp. 1279-1286, 2016.

NONES, D. L. **Cadeia produtiva de pellets e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. **Pellets de biomassa mista para produção de energia térmica: Uma revisão de modelos de combustão**. Appl. Energia **127**, 135–140, 2014.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets**. London: Earthscan, 593 p., 2010.

OLIVEIRA, C.M. **Wood Pellets Brasil**. Edição eletrônica (2012), 53p. Disponível em: <http://pt.calameo.com/read/00089539002c2bf637402>. Acesso: 13 mai. 2018.

OZGEN, S.; CASERINI, S.; GALANTE, S.; GIUGLIANO, M.; ANGELINO E.; MARONGIU, A.; HUGONY, F.; MIGLIAVACCA, G.; MORREAL, C.. **Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets**. Atmos. Environ., 94, pp. 144-153, 2014.

PEKSA-BLANCHARD, M.; DOLZAN, P.; GRASSI, A.; HEINIMÖ, J.; JUNGINGER, M.; RANTA, T.; WALTER, A. Global Wood Pellets Markets and Industry: Policy Drivers, Market Status and Raw Material Potential. **IEA. Bioenergy Task 40**. 2007.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; CANAL, W. D. Influência da adição de lignina kraft nas propriedades de pellets de eucalipto. **FLORESTA**, v. 46, n. 2, p. 235 - 242, 2016.

PROSKURINA, S.; VAKKILAINEN, E.; HEINIMÖ, J.; MIKKILÄ, M. The Russian wood pellet business: exports to the nordic area. **In: Proceedings of the 22nd European biomass conference and exhibition**. Hamburg, Germany, 2014.

PROSKURINA, S.; HEINIMÖ, J.; MIKKILÄ, M.; VAKKILAINEN, E. The wood pellet business in Russia with the role of North-West Russian regions: present trends and future challenges. **Renewable Sustainable Energy**. Rev 51:730–740, 2015.

PROSKURINA, S.; RIMPPI, H.; HEINIMÖ, J.; HANSSON, J.; ORLOV, A.; RAGHU, K. et al. Logistical, economic, environmental and regulatory conditions for future wood pellet transportation by sea to Europe: The case of Northwest Russian seaports. **Renewable Sustainable Energy**. Rev 56:38–50, 2016.

PROSKURINA, S.; ALAKANGAS, E.; HEINIMÖ, J.; MIKKILÄ, M.; VAKKILAINEN, E. A survey analysis of the wood pellet industry in Finland: Future perspectives. **Energy**, 118(1):692–704, 2017.

- RANGEL, A. et al. Simulação computacional para análise do frete no transporte de cana-de-açúcar – um estudo de caso no estado do Rio de Janeiro. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v.3, n. 3, p.250-261, 2008.
- ROSILLO-CALLE, F.; HEMSTOCK, S.; GROOT, P.; WOODS, J. **The Biomass Assessment Handbook: Bioenergy for a Sustainable Environment**. Earthscan, London, 276p., 2007.
- RUIZ, D.; SAN MIGUEL, G.; CORONA, B.; LOPEZ, F. LCA of a multifunctional bioenergy chain based on pellet production. **Fuel**, 215, 601–611, 2018.
- SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renew. Sustain. Energy. Rev.*, 15 (5), pp. 2262-2289, 2011.
- SCATOLINO, M. V.; NETO, L. F. C.; PROTÁSIO, T. P.; CARNEIRO, A. C. O.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES, J. B. J.; MENDES, L. M. **Options for Generation of Sustainable Energy: Production of Pellets Based on Combinations Between Lignocellulosic Biomasses**. *Waste and Biomass Valorization*. V.9, ed. 3, pp 479–489, 2018.
- SCHNEIDER, V. E.; PERESIN, D.; TRENTIN, A. C.; BORTOLIN, T. A.; SAMBUICHI, R. H. R. Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas - IPEA. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. 134p., 2012.
- SERRANO, D.M.C. **Avaliação do Potencial de Produção e Exportação de Pellets Combustível no Polo Florestal da Região Sul do Brasil**. 104 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, SP, 2009.
- SHAW, M. **Feedstock and process variables influencing biomass densification**. PhD dissertation submitted to Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada. 2008.
- SIKKEMA, R.; JUNGINGER, M.; PICHLER, W.; HAYES, S.; FAAIJ, A. P. C. The international logistics of wood pellets for heating and power production in Europe: costs, energy-input and greenhouse gas balances of pellet consumption in Italy, Sweden and The Netherlands. **Biofuels Bioprod Biorefining**, 4, pp. 132-153, 2010.
- SIKKEMA, R.; STEINER, M.; JUNGINGER, M.; HIEGL, W.; HANSEN, M. T.; FAAIJ, A. P. C. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. **Biofuels Bioprod Biorefin.** 3:250–278, 2011.
- STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. **A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources**. 35 (2), pp. 910 – 918, 2011.
- STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 2, p. 910-918, 2011b.
- STELTE, W.; SANADI, A. R.; SHANG, L.; HOLM, J. K.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. Recent developments in biomass pelletization - a review. **Bioresources**. v. 7, n. 3, p. 4451-4490, 2012.
- STRAUSS, W. **Global Industrial Wood Pellet Markets – Future Demand and Future Prices**. FutureMetrics, 2017.
- TAVARES, M. A. M. E.; TAVARES, S. R. L. **Perspectivas para a participação do Brasil no mercado internacional de pellets**. *Holos*, v. 5, n. 31, p. 292-306. 2015.

THRÄN, D.; WITT, J.; SCHAUBACH, K.; KIEL, J.; CARBO, M.; MAIER, J.; NDIB, C.; KOPPEJAN, J.; ALAKANGAS, E.; MAJER, S.; SCHIPFER, F. Moving torrefaction towards market introduction – Technical improvements and economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the SECTOR Project. **Biomass Bioenergy**, 89, pp. 184-200, 2016.

THRÄN, D.; PEETZ, D.; SCHAUBACH, K.; BACKÉUS, S.; BENEDETTI, L.; BRUCE, L. et al. Global Wood Pellet Industry and Trade Study. **IEA Bioenergy Task 40**, The Netherlands, 2017.

TUMULURU, J. S. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. **Biosystems Engineering**, v. 119, p. 44-57, 2014.

TUMULURU, J. S.; SOKHANSANJ, S.; HESS, A. R.; WRIGHT, C. T.; BOARDMAN, R. D. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Ind Biotechnol**. 7(5):384-401, 2011.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. 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.

VERDESIO, J.J. **Viabilidade das energias renováveis no Brasil**. Universidade de Brasília. Brasília, 68p., 2008.

VISASPACE. **Wood or Agricultural Pellets - Pluses & Minuses** (2011). Disponível em: <http://www.viaspace.com/docs/Giant King Grass - Asia Pellets Trade Seoul.pdf>. Acesso em: 21 Fev. 2017.

WBA, **The Global Bioenergy Statistics**. 2016. Disponível em: <http://www.worldbioenergy.org/content/wba-launches-global-bioenergy-statistics-2016>. Acesso em: 25 set. 2017.

WPAC – **Wood Pellets Association of Canada. Global pellet market outlook in 2017**. Disponível em: <https://www.pellet.org/wpac-news/global-pellet-market-outlook-in-2017>. Acesso em: 20 fev. 2017.

YOUSAF, B. G. J.; Abbas, Q.; WANG, R. W.; ALI, M. U.; ULLAH, H.; LIU, R. J.; ZHOU, C. C. Systematic investigation on combustion characteristics and emission-reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass- and biochar-coal co-combustion systems. **Appl. Energy**, 208, pp. 142-157, 2017.

ZAMORANO, M.; POPOV, V.; RODRÍGUEZ, M. L.; GARCÍA-MARAVÉ, A. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. **Renewable Energy**, v. 36, n. 11, p. 3133-3140, 2011.

ZHANG, Y. M.; MCKECHNIE, J.; CORMIER, D.; LYNG, R.; MABEE, W.; OGINO, A.; MACLEAN, H. L. Life cycle emissions and cost of producing electricity from coal, natural gas, and wood pellets in Ontario, Canada. **Environ Sci Technol**. 44(1):538–544, 2010.

ARTIGO I

PROPRIEDADES DA MATÉRIA-PRIMA E DE *PELLETS* PRODUZIDOS COM MISTURAS DE MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO

RESUMO

No Brasil, tem-se disponível grande quantidade de biomassas que podem ser alternativas para produção de *pellets*, e com o mercado em constante ascensão, a busca por matérias-primas com potencial para geração de energia e baixo custo torna-se uma necessidade em atendimento ao setor. *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., são as principais fontes de fornecimento de madeira no Brasil. Portanto, o objetivo principal deste estudo foi avaliar a qualidade de *pellets* produzidos com diferentes proporções de misturas entre partículas de madeiras de reflorestamento. Foram utilizadas partículas de *Eucalyptus* sp. e de *Pinus* sp. As porcentagens de eucalipto em relação ao pinus foram: 0, 10, 20, 50, 80 e 90%. Foi realizada a caracterização das biomassas. Os *pellets* foram produzidos em matriz peletizadora horizontal de escala laboratorial com sistema de vapor aquecido. Os *pellets* foram avaliados quanto às propriedades físicas, químicas, energéticas e mecânicas. O poder calorífico superior diminuiu com o aumento da porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura. O teor de cloro e cinzas estão dentro da faixa estabelecida pelos parâmetros internacionais para *pellets* de madeira. A durabilidade mecânica média dos *pellets* produzidos foi de 93%. Os *pellets* com 80% de eucalipto e 20% de pinus destacaram-se quanto à densidade, taxa de compactação e propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Bioenergia. Biocombustível sólido. Resíduo florestal. Densificação da biomassa.

ABSTRACT

In Brazil, a large amount of biomass is available that can be alternatives for pellet production, and with the market constantly rising, the search for raw materials with potential for energy generation and low cost becomes a necessity in service to the sector. *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp., are the main sources of wood supply in Brazil. Therefore, the main objective of this study was to evaluate the quality of pellets produced with different proportions of mixtures between wood particles of reforestation. Particles of *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp were used. The percentages of eucalyptus in relation to pinus were: 0, 10, 20, 50, 80 and 90%. Characterization of the biomass was carried out. The pellets were produced in laboratory scale horizontal pelletizing matrix with heated steam system. Pellets were evaluated for physical, chemical, energetic and mechanical properties. The higher calorific value decreased with increasing percentage of *Eucalyptus* sp. in the mixture. The content of chlorine and ash is within the range established by international parameters for wood pellets. The average mechanical durability of the pellets produced was 93%. Pellets with 80% of eucalyptus and 20% of pinus stood out for density, compaction rate and mechanical properties.

Keywords: Bioenergy. Solid biofuel. Forest residue. Biomass densification.

1 INTRODUÇÃO

A bioenergia possui papel importante na desaceleração dos processos de aquecimento global. O uso de fontes de energia renováveis para substituir os combustíveis fósseis, aumentar os sumidouros de carbono terrestres, capturar e armazenar carbono estão entre as principais opções de mitigação para atingir as metas climáticas (BIRDSEY et al., 2018).

Muito tem sido escrito sobre as questões ambientais relacionadas à crescente utilização de biomassa lenhosa para bioenergia, por exemplo, (BIRDSEY et al., 2018; DALE et al., 2017; SCHLESINGER, 2018; CORNWALL, 2017; ROBERTSON et al. 2017).

No entanto, a biomassa têm algumas características, como formas e tamanhos de partículas heterogêneas, alta umidade e baixa densidade de energia que dificultam seu uso como biocombustível sólido (CASTELLANO et al., 2015).

Uma das possibilidades de reduzir ou eliminar os principais problemas associados ao uso direto da biomassa são por meio de processos de compactação, como a peletização (SETTE et al., 2016).

Essa tecnologia pode melhorar as propriedades físicas da biomassa e produzir um produto mais uniforme, estável e com maior densidade energética para a produção de combustíveis ecologicamente corretos (WHITTAKER e SHIELD, 2017).

Governos de todo o mundo estão utilizando mais biomassa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Com isso, o mercado internacional de biomassa florestal na forma de *pellets* de madeira aumentou drasticamente nos últimos anos, sendo a Europa o principal importador e a América do Norte o principal exportador (JUNGINGER et al., 2008, 2011; LAMERS et al., 2012; DALE et al., 2017; PORSÖ et al., 2018), principalmente devido à Diretiva de Energias Renováveis - RED II (EU, 2016).

As matérias-primas usadas atualmente para a produção de biocombustível sólido são, principalmente, resíduos de madeira, como aparas e serragem (HANSTED et al., 2016).

Pellets de madeira de eucalipto produzidos no Brasil são opção promissora porque o eucalipto é a espécie florestal mais importante para o fornecimento de madeira no país (EUFRADE et al., 2016). Assim como *pellets* de pinus, principal matéria-prima utilizada em todo o mundo para produção desse biocombustível (MONEDERO et al. 2015).

Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar *pellets* produzidos com diferentes proporções de misturas de partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., e determinar a mistura que resulta em *pellets* com características mais favoráveis ao uso doméstico e industrial.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e preparo da matéria-prima: *Eucalyptus* (E) e *Pinus* (P)

A matéria-prima utilizada para a execução do trabalho foi cedida pela empresa Biofogo, localizada em Ressaquinha – MG. A matéria-prima consiste em partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., com dimensões próximas a 5 milímetros. As partículas de *Eucalyptus* sp. são provenientes do processamento mecânico de espécies comerciais de eucalipto encontrada na região da empresa e foram obtidas a partir da madeira sem casca. As partículas de *Pinus* sp. são provenientes de resíduos de serrarias também localizados na região.

Após a coleta da matéria-prima, foram preparados 7 (sete) tratamentos descritos na Tabela 1. Posteriormente, a umidade dos tratamentos foi ajustada para $16 \pm 2\%$, base seca.

Tabela 1 – Composição dos tratamentos.

Tratamentos	Composição das misturas (Base massa seca)	
	<i>Eucalyptus</i> sp.	<i>Pinus</i> sp.
1	100%	0%
2	90%	10%
3	80%	20%
4	50%	50%
5	20%	80%
6	10%	90%
7	0%	100%

Fonte: Do autor (2018).

2.2 Caracterização da matéria-prima

Foram analisadas as proporções entre as partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., ou seja, os 7 (sete) tratamentos, quanto às seguintes características:

A umidade, base seca, foi determinada de acordo com a norma DIN EN 14774-1 (Deutsches Institut Für Normung, 2010), em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, considerando três repetições.

A determinação da densidade a granel das biomassas e das misturas foi realizada por meio da utilização de proveta de 100 cm^3 preenchida com a amostra. A proveta preenchida foi pesada em balança com precisão de 0,1 g. A densidade a granel foi calculada pela razão entre a massa obtida e o volume da amostra (100 cm^3). Foram realizadas três repetições por tratamento.

Os teores de extrativos foram determinados, de acordo com a norma TAPPI 204 cm-97 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1997). A lignina total foi determinada seguindo os procedimentos da norma TAPPI T 222 om-02 (TAPPI, 2002).

A holocelulose foi obtida por diferença, conforme a Equação 1.

$$\text{HOL} = 100 - \text{EXT} - \text{LT} - \text{CZ} \quad (1)$$

Em que:

- HOL: Holocelulose (%);
- EXT: Extrativos (%);
- LT: Lignina total (%);
- CZ: Cinzas (%).

A caracterização química imediata utilizada para quantificar materiais voláteis, cinzas e, por diferença, carbono fixo foi obtida de acordo com a descrição da norma ASTM D1762-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2007).

A quantificação do cloreto (Cl-) das amostras de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas Industriais e Ambientais – LAQIA, da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS. Como método de preparo das amostras, utilizou-se a decomposição por combustão iniciada por micro-ondas (Multiwave 3000®, Microwave Sample Preparation System,). Para a determinação do cloro foi utilizado, cromatógrafo de íons (Professional 850, Metrohm, Suíça) equipado com detector de condutividade. A separação dos ânions foi feita utilizando uma coluna de troca iônica preenchida com grupos de amônio quartenário suportados em poli(álcool vinílico) (Metrosep A Supp 5, Metrohm) 250 x 4 mm de diâmetro interno, 5 μm de diâmetro de partícula e uma coluna de guarda com mesmo preenchimento (Metrosep A Supp Guard 4/5, Metrohm). Uma

alça de amostragem de 100 μL foi utilizada para a injeção da amostra e a vazão da bomba foi ajustada para 0,7 mL min^{-1} .

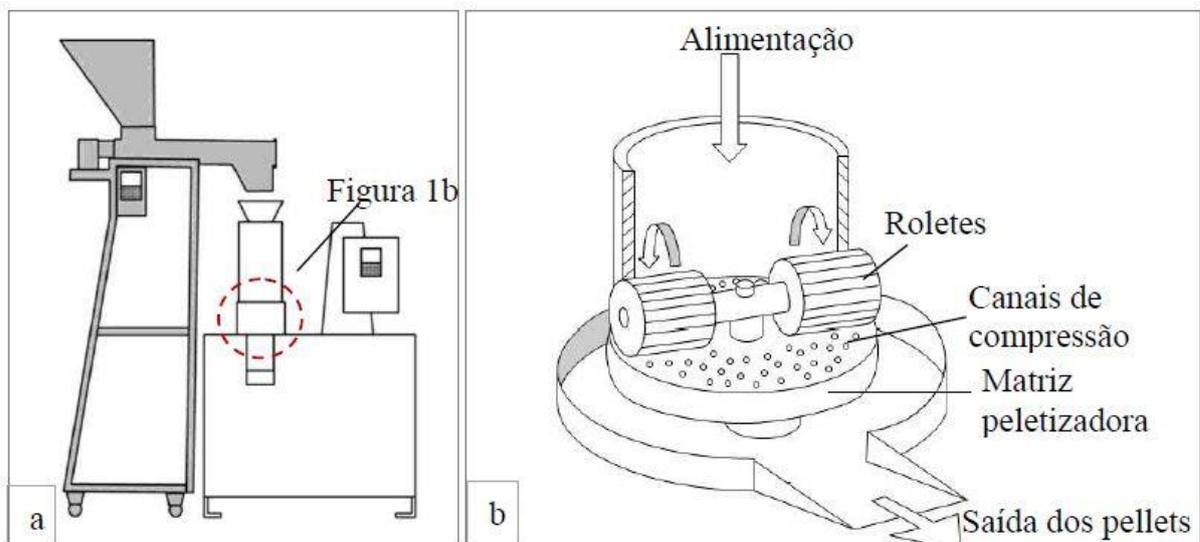
A determinação do poder calorífico superior (PCS) foi realizada utilizando calorímetro digital da marca IKA C-200 de acordo com os procedimentos descritos na ASTM E711-87 (ASTM, 2004). Foram consideradas amostras em duplicata, sendo as amostras classificadas em peneiras de 40-60 mesh e secas em estufa a $103\pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante antes da determinação.

2.3 Processo de peletização

Foram produzidos aproximadamente 3 (três) kg de *pellets* por tratamento, (Tabela 1), com exceção do Tratamento 1, ou seja foram produzidos somente os 6 demais tratamentos da tabela. Tal fato foi devido a limitação da peletizadora, que impossibilitou a produção dos *pellets* 100% de eucalipto.

O processo de densificação dos tratamentos produzidos foram realizados em uma prensa peletizadora laboratorial da marca Amandus Kahl, modelo 14-175 com capacidade para produção de 30 kg.h^{-1} e matriz plana horizontal com canais de 6 mm de diâmetro, conforme a Figura 1.

Figura 1 – (a) Sistema de alimentação, em cinza, e peletizadora; (b) Matriz plana horizontal perfurada e os dois rolos extrusores.



Fonte: Pereira (2014).

A temperatura média de peletização ficou em torno de 105°C e a velocidade de rotação dos roletes foi de 1.500 rpm. Para alimentação da peletizadora foi utilizado um sistema composto por um motor elétrico, um controlador de velocidade e uma rosca-sem-fim com quatro bicos de injeção de vapor produzido por uma autoclave. O vapor injetado estava a uma pressão entre 0,5 a 1 kgf·cm⁻².

Após a produção, os *pellets* foram resfriados a temperatura ambiente e condicionados em sacos plásticos até a realização dos ensaios.

2.4 Caracterização dos *pellets*

2.4.1 Propriedades Físicas

A determinação da umidade, base seca, além da densidade a granel dos *pellets* foi realizada de acordo com as mesmas metodologias utilizadas para a caracterização das matérias-primas. Foram realizadas três repetições por tratamento.

A densidade aparente unitária dos *pellets* foi determinada utilizando o método estereométrico, ou seja, o volume foi calculado considerando a forma cilíndrica dos *pellets* e a massa obtida com o uso de balança analítica com precisão de 0,01 g. Para esse procedimento foram amostrados aleatoriamente 100 (cem) *pellets* de cada tratamento.

O diâmetro (mm) e comprimento (mm) dos *pellets* foram obtidos conforme a norma DIN EN 16127 (Deutsches Institut Für Normung, 2012), com medição realizada com paquímetro digital. Foram considerados 100 (cem) *pellets* para cada composição.

A taxa de compactação foi obtida pela razão entre a densidade a granel dos *pellets* e a densidade a granel da biomassa ou da mistura entre elas.

2.4.2 Propriedades Químicas

O processo de peletização não altera as propriedades químicas das matérias-primas (MARAVÉ et al., 2015). Portanto, para a caracterização química dos *pellets* foram considerados os mesmos valores encontrados para os tratamentos antes do processo de peletização.

2.4.3 Propriedades Energéticas

O poder calorífico superior (PCS) utilizado para o cálculo das propriedades energéticas foi o mesmo obtido para os tratamentos antes da peletização. Como verificado por Sette et al., (2018) trabalhando com a densificação do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* por meio de briquetagem, concluíram que os valores de PCS antes e após o processo, não se diferem.

Assim, foi calculada a densidade energética unitária dos *pellets*, produto da densidade unitária dos *pellets* e do poder calorífico superior médio (PCS).

A densidade energética a granel dos *pellets* foi obtida pelo produto das densidades a granel (D_g) e dos poderes caloríficos médios (PCS).

2.4.4 Propriedades Mecânicas

A durabilidade mecânica e a porcentagem de finos (partículas menores que 3,15 mm) foram determinadas utilizando o equipamento Ligno-Tester, Holmen®, de acordo com a norma DIN EN 15210-1 (DIN, 2010b). Para tanto, amostras de *pellets* foram ventiladas por meio de jato de ar que simula a destruição natural dos *pellets* durante o transporte e manuseio. Para a determinação da porcentagem de finos, o fluxo de ar tem pressão de 30 mbar e duração de 30 segundos. Posteriormente, as amostras sem finos foram submetidas a outro fluxo de ar controlado (70 mbar) durante 60 segundos para determinação da durabilidade mecânica. Foram realizadas três repetições por tratamento.

A dureza ou resistência à compressão manual, em kg, foi determinada pelo ensaio em durômetro manual com escala de 0 a 100 kg, da marca Amandus Kahl. Um *pellet*, por vez, foi inserido no durômetro com carga crescente até fratura da amostra. Então, foi realizada a leitura da carga máxima que um *pellet* pode suportar antes de romper. Foram considerados 25 *pellets* para cada tratamento. Este teste simula o esforço de compressão devido ao peso dos *pellets*, uns sobre os outros durante a armazenagem em depósitos ou silos (LI e LIU, 2000).

Todas as análises das propriedades mecânicas dos *pellets* foram realizadas no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

2.5 Análise estatística dos dados

O experimento foi instalado segundo delineamento inteiramente casualizado (DIC) com sete tratamentos para a caracterização da biomassa e seis tratamentos para a avaliação dos *pellets* produzidos com as misturas entre elas.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), pelo Teste F a 5% de significância, para verificação das diferenças existentes entre os tratamentos. Havendo diferença significativa entre os tratamentos, realizou-se a análise de regressão.

Ajustou-se o modelo adequado levando em consideração o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão residual e a distribuição dos resíduos, quando estabelecido diferenças significativas entre os tratamentos.

Foi verificada a relação entre os valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* por meio de Correlação de Pearson. O teste T foi aplicado para verificar se a correlação era diferente de zero.

As variáveis analisadas apresentaram número de repetições variadas, pois cada análise foi realizada por meio de métodos laboratoriais específicos.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R, versão R version 3.5.1. (R Foundation for Statistical Computing, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das Biomassas

A umidade, base seca, dos tratamentos variou de 9,04 (tratamento 6) a 15,07% (tratamento 7). Após condicionamento, todos os tratamentos encontravam-se com umidade, base seca, próxima a $16\pm 2\%$. Conhecer a umidade da biomassa é fator importante, pois afeta a qualidade dos *pellets* (SAMUELSSON et al. 2012). A água desempenha papel significativo no processo de peletização, podendo atuar como agente de ligação que afeta a durabilidade mecânica. Além de estar negativamente correlacionada ao atrito durante a peletização, uma vez que funciona como lubrificante que abaixa a fricção na matriz de peletização (KALIYAN & MOREY, 2009). A diminuição da fricção está associada a menor necessidade de energia para peletização (STELTE et al., 2011), fato que pode diminuir substancialmente os custos de produção.

Estudos indicam umidade da biomassa para produção de *pellets* entre 5 e 12% (LI e LIU, 2000; OBERNBERGER e THEK, 2010), demonstrando que a umidade ideal varia para diferentes tipos de matéria-prima e configurações de produção, possivelmente por conta da composição química do material e formato das partículas.

Verifica-se que a densidade a granel dos tratamentos (Figura 2) variou seus valores médios entre 186,66 a 229,00 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. De acordo com Tumuluru et al. (2011) a densidade a granel da madeira em serragem varia de 150 a 250 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Assim, todos os valores obtidos são coerentes com os valores encontrados por Tumuluru et al. (2011).

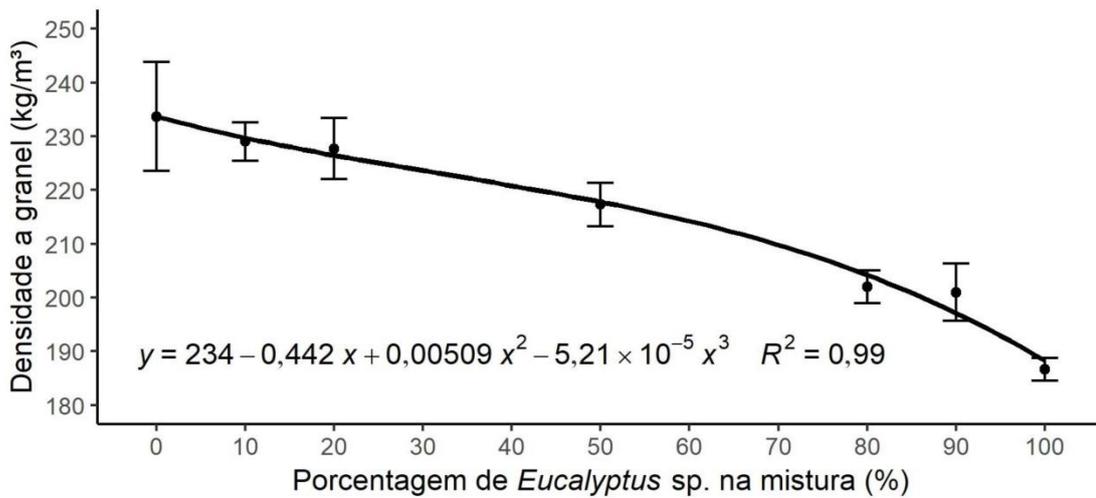


Figura 2 – Relação funcional observada entre a densidade a granel e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

O poder calorífico superior (PCS) expressa a quantidade de energia contida numa massa de madeira totalmente seca. Consiste em uma das propriedades mais importantes para se caracterizar um material como combustível (GILLESPIE et al., 2013). Nesse quesito houve efeito das diferentes porcentagens de eucalipto na mistura de biomassas (Figura 3). De forma geral os tratamentos com maiores proporções de pinus apresentaram maiores valores de PCS, possivelmente devido à natureza química dos extrativos presentes nesta biomassa, quantidade e tipo de lignina (VAN LOO e KOPPEJAN, 2008). O maior valor médio foi de 20,08 MJ·kg⁻¹ (100% pinus) e o menor de 18,85 MJ·kg⁻¹ (100% eucalipto).

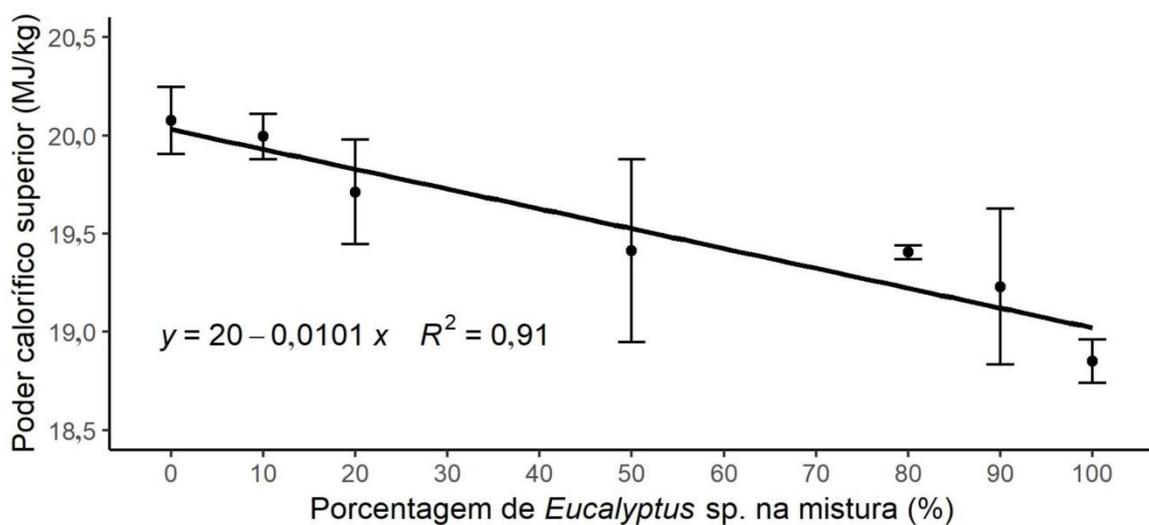


Figura 3 – Relação funcional entre o poder calorífico superior (PCS) e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Intervalos similares de valores de PCS foram relatados para várias espécies de madeira e culturas energéticas na literatura (TELMO e LOUSADA, 2011; CARROLL e FINNAN, 2012; ACDA, 2015).

Os teores de lignina, extrativos e cinzas são fundamentais para a seleção de materiais lignocelulósicos para a produção de energia, pois influenciam diretamente o poder calorífico dos materiais, seja positiva ou negativamente (PAULA et al., 2011; DEMIRBAS, 2001).

Observa-se, na Figura 4, que houve efeito da porcentagem de eucalipto na mistura. De acordo com a curva ajustada, o teor de lignina diminui até aproximadamente 30% de eucalipto na mistura, na sequência aumenta até 70% e desce de forma cúbica. O comportamento verificado para lignina não foi o esperado possivelmente devido a fatores aleatórios não controlados.

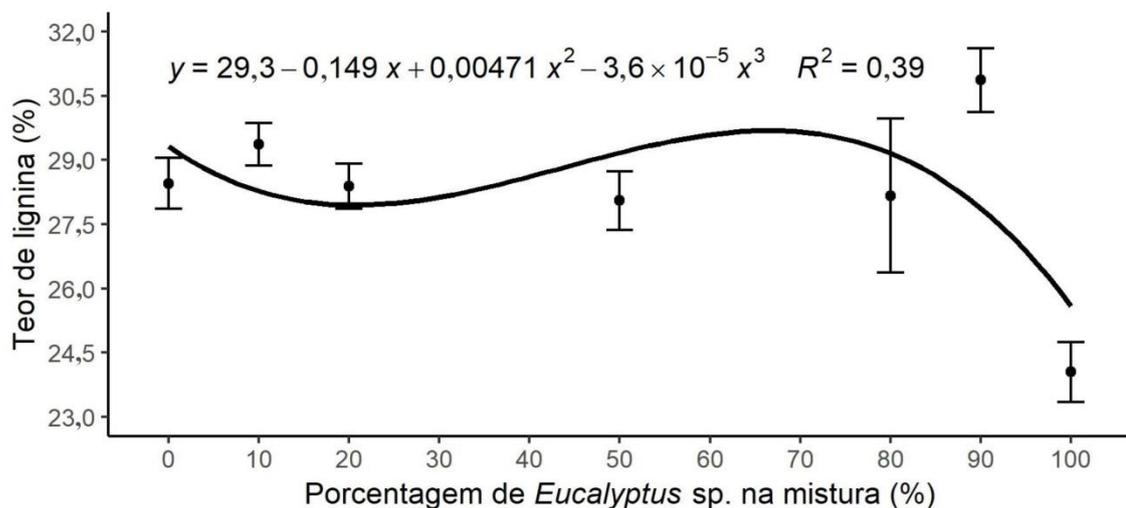


Figura 4 – Relação funcional entre o teor de lignina e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Para a peletização maiores teores de lignina são requeridos, pois a lignina atua como agente natural de ligação entre as partículas, contribuindo positivamente sobre as propriedades mecânicas (KALIYAN; MOREY, 2010; CARROLL; FINNAN, 2012), e o poder calorífico. Os valores encontrados para lignina total estão condicentes com os encontrados na literatura para madeira de eucalipto, com valor médio de 24,05% e pinus, com 28,45% de média (PEREIRA et al., 2016; SIQUEIRA, 2017).

A lignina de folhosas tende a conter menos grupos hidroxila fenólicos e mais grupos metoxila do que as coníferas, e isso tem o efeito de diminuir a temperatura de transição vítrea. Por isso, de acordo com Stelte et al., (2011), se tratando de peletização na

mesma temperatura (100°C), os *pellets* de folhosas (*Fagus sylvatica*) formam mais pontes sólidas e mostram maior durabilidade em comparação com coníferas (*Picea abies*).

Para o teor de extrativos (Figura 5) a porcentagem de eucalipto na mistura teve efeito significativo. Os menores teores de extrativos foram encontrados nos tratamentos com 100 e 90% de eucalipto, ou seja, aqueles que continham nenhuma ou a menor quantidade de pinus em sua composição.

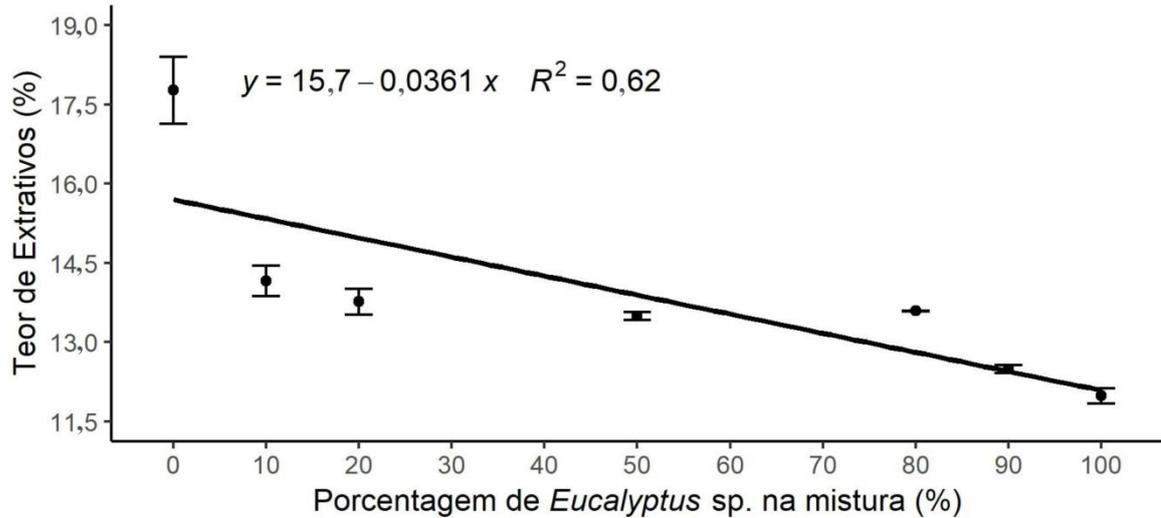


Figura 5 – Relação funcional entre o teor de extrativos e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Os extrativos têm efeito duplo no processo de peletização, eles formam uma camada limite fraca impedindo que as partículas se unam fortemente, mas também produzem um efeito lubrificante, resultando em menor atrito dentro dos canais da matriz (CASTELLANO et al., 2015).

O teor de holocelulose, que representa o somatório da celulose e hemiceluloses, compõe o maior percentual da composição química dos materiais lignocelulósicos. Verifica-se efeito significativo da porcentagem de eucalipto na mistura (Figura 6). O padrão de relação encontrado é dependente dos resultados do teor de lignina, extrativos totais e cinzas, pois os tratamentos com maior teor de lignina e extrativos resultaram em menor teor de holoceluloses, como verificado para os materiais com 10 e 0% de eucalipto (tratamentos 6 e 7).

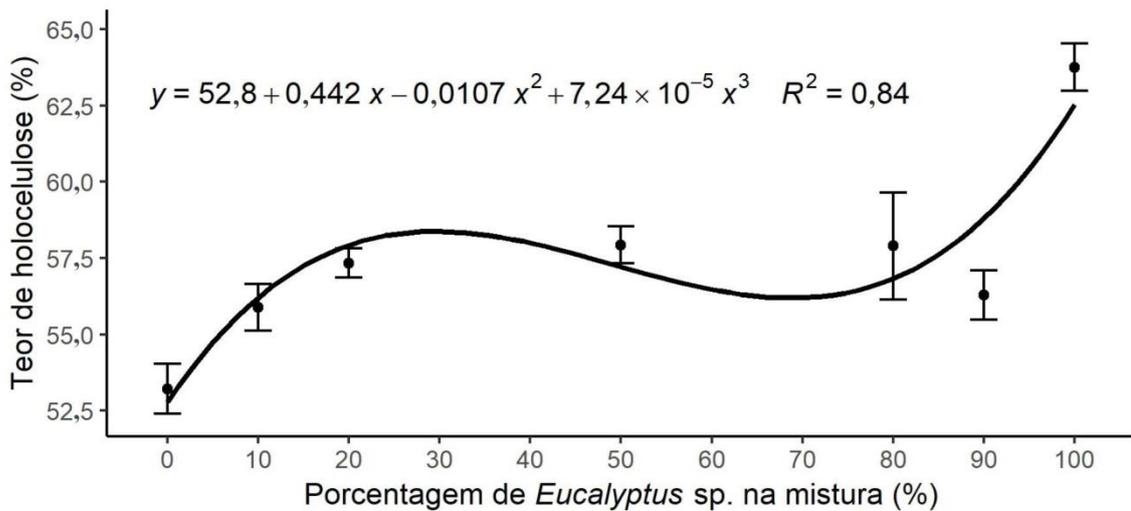


Figura 6 – Relação entre o teor de holocelulose e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Os resultados da regressão para materiais voláteis estão apresentados na Figura 7. Valores altos de materiais voláteis são favoráveis, pois contribuem decisivamente para ajudar na ignição do combustível (PODDAR et al., 2014), uma vez que na hora da combustão os componentes de CO, CO₂, CH₄ e H₂ são emitidos, o que facilita a ignição dos *pellets*. Os valores encontrados são condizentes com os descritos por Sette et al. (2018) para madeira de *Eucalyptus urograndis*, cujos valores foram, 83,1%; 0,3% e 16,7% para materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente. Também condizem com os valores médios relatado por Protásio et al. (2015) para *pellets* de madeira residual de *Pinus*, que foram de 84,5%; 0,3% e 15,2% para materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente.

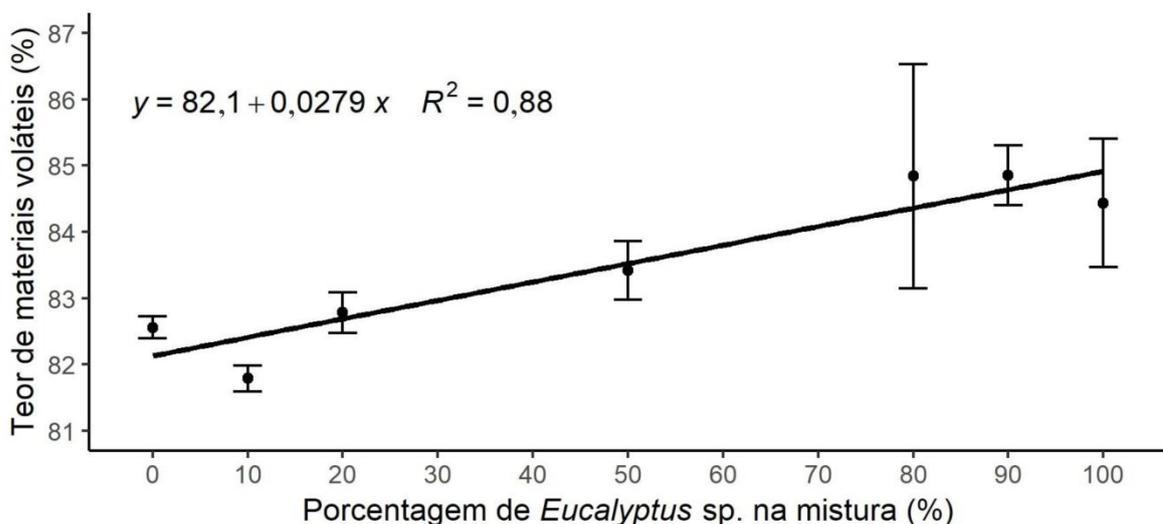


Figura 7 – Relação funcional entre o teor de materiais voláteis e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Pode-se inferir que as misturas com 90 e 80% de eucalipto resultaram em *pellets* com menor temperatura de ignição, uma vez que, a maior quantidade e a emissão rápida de materiais voláteis são fatores que contribuem decisivamente para acelerar a ignição do combustível a temperaturas mais baixas (MOON et al., 2013).

Ao contrário, os demais combustíveis com maiores teores de carbono fixo (Figura 8) tendem a queimar mais lentamente, apresentam maior estabilidade térmica e temperatura de ignição acima da média.

O teor de carbono fixo variou de 14,72% (80% de eucalipto, tratamento 3) a 17,73% (10% de eucalipto, tratamento 6). Sendo que, os melhores resultados foram encontrados para 20, 10 e 0% de eucalipto (tratamentos 5, 6 e 7).

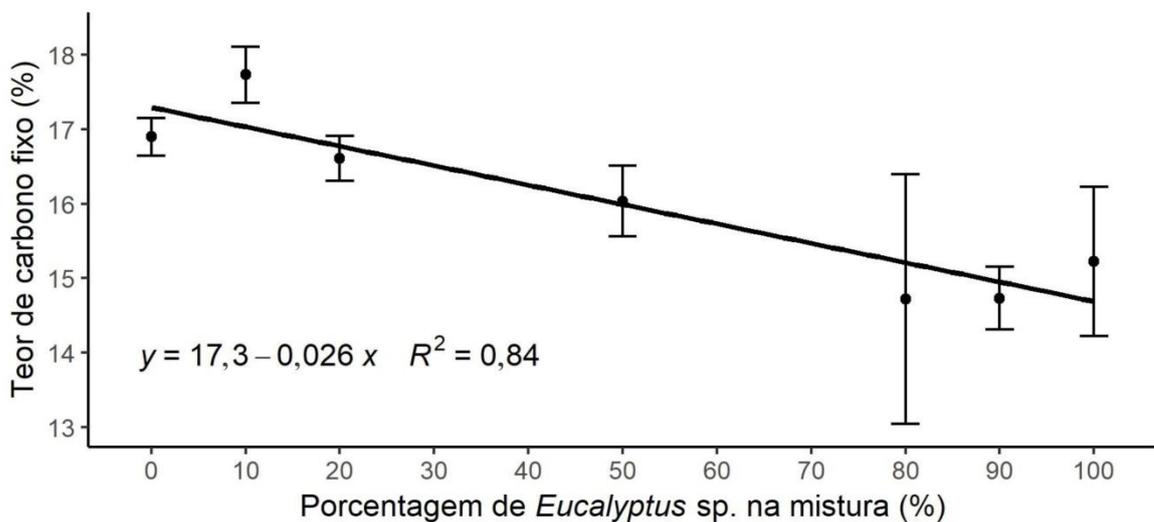


Figura 8 – Relação funcional para o teor de carbono fixo e a porcentagem de *Eucalyptus sp.* na mistura.

O teor de cinzas (Figura 9) foi ligeiramente superior nos tratamentos com maior quantidade de pinus na mistura. Esse fato pode ser justificado por se tratarem de partículas provenientes de resíduos de serraria, mais suscetível à contaminação durante o processamento do material. Enquanto as partículas de eucalipto são provenientes do processamento da madeira sem casca, na qual é realizado na empresa com os devidos cuidados.

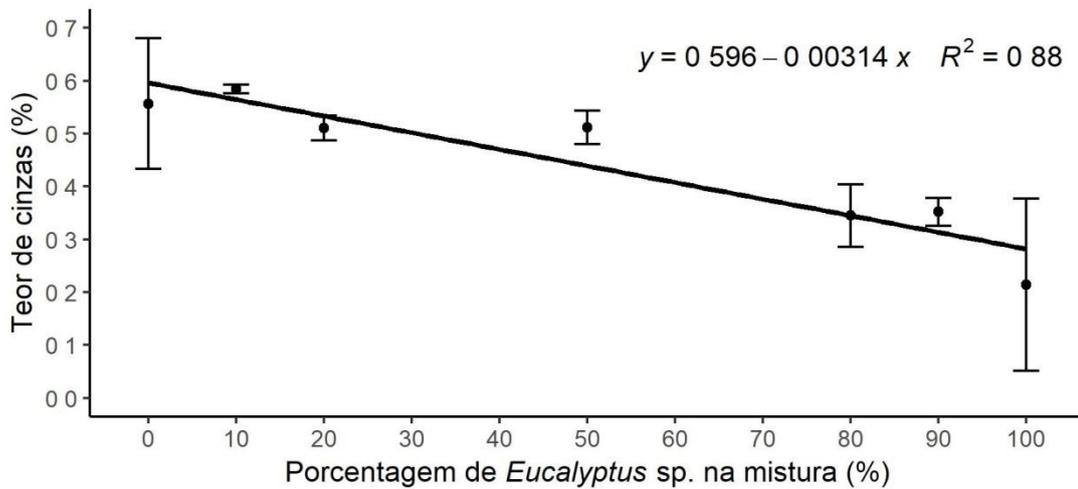


Figura 9 – Relação funcional entre o teor de cinzas e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

As cinzas são componentes indesejáveis nos processos industriais e, principalmente, no uso doméstico da biomassa (aquecimento residencial), pois quanto mais alto o teor de minerais do material, menor o poder calorífico do combustível, conseqüentemente, há maior quantidade de resíduos para ser removido no final da combustão. Muitos estudos têm apontado as cinzas como componente que pode auxiliar na predição do PCS (CORDERO et al., 2001; SHEN et al., 2010). No entanto, tal relação negativa entre cinzas e o PCS não ocorreu neste trabalho. O aumento no teor de cinzas não foi suficiente para afetar negativamente o poder calorífico superior.

Outro fator indesejável das cinzas é que, o contato deste resíduo com partes metálicas favorece ocorrência de corrosão, diminuindo a vida útil do equipamento (RICHARDSON et al., 2002). A existência de altos teores de cinzas é um parâmetro que pode determinar a exclusão da matéria-prima para produção de *pellets* (PEREIRA, 2014).

O baixo teor de cinzas é uma das características do eucalipto, o que o torna viável para uso como fonte energética, apresentando valores abaixo de 1% (GOMINHO et al., 2012).

O cloro não faz parte da constituição química da madeira e está presente, principalmente, devido à contaminação com a água de precipitação das regiões tropicais. Tal água, é proveniente majoritariamente dos oceanos com alta evaporação e concentrações molares de íons inorgânicos dissolvidos na chuva de até 85%, contendo o elemento cloro, em altas taxas de (NaCl), sendo absorvidos nas biomassas em seu processo de crescimento (STUMM & MORGAN, 1970; RILEY & CHESTER, 1971; KEENE et.al., 1986; MELLO, 2001).

O teor de cloro encontrado nas partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., foi inferior a $10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (micrograma do elemento por grama de amostra). Isso indica que o material utilizado é viável, neste quesito, para a peletização, uma vez que atende as exigências das principais normas internacionais de comercialização para *pellets* de madeira, como por exemplo, à ISO 17225-2 (2013), que estabelece valor menor ou igual a 0,02% de cloro na amostra.

O cloro desencadeia a formação de compostos como HCl, dioxinas e furanos. A maior parte do cloro permanece nas cinzas volantes, o restante forma HCl, que em processos de condensação, juntamente com outros compostos, também provoca corrosão nas partes metálicas internas das caldeiras e chaminés (ESCOBAR, 2016).

3.2 Caracterização dos *Pellets*

Parte da umidade na biomassa é perdida por meio do calor de fricção desenvolvido na matriz devido à compressão e extrusão. Segundo Tumuluru et al. (2014; 2015; 2016) a umidade da biomassa reduz em cerca de 5-10% (base úmida) em função das condições do processo.

A umidade dos tratamentos diminuiu de $16\pm 2\%$ para valores abaixo de 10% (base seca). A baixa umidade na produção de *pellets* é reconhecida como importante parâmetro para racionalizar os sistemas de transporte de longa distância do Brasil para a Europa (CAVALETT et al., 2018).

Os resultados da regressão (Figura 10) mostraram efeito significativo da porcentagem de eucalipto. Nota-se maior diferença de umidade para os tratamentos 2 e 3 (90 e 80% de eucalipto) em relação aos demais. Isso ocorreu, provavelmente, porque esses tratamentos tiveram tempo de retenção maior na peletizadora, devido a maior dureza do material (maior porcentagem de eucalipto) e conseqüentemente, maior atrito e temperatura no interior da matriz.

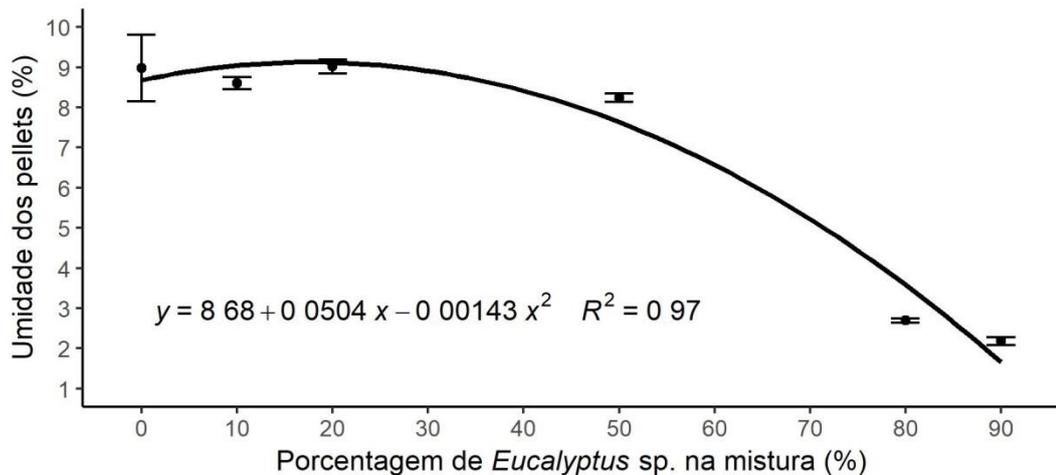


Figura 10 – Relação funcional entre a umidade dos *pellets* e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

O condicionamento de vapor e o pré-aquecimento da biomassa ajudam a ativar alguns dos componentes de ligação à biomassa, como lignina, amido, proteínas e carboidratos solúveis em água, que ajudam a produzir *pellets* duráveis (TUMULURU, 2016).

Sabe-se que o aumento da temperatura do material aumenta sua flexibilidade e facilita a prensagem, particularmente quando combinado com aumento da umidade (FILBAKK et al., 2011) e que temperaturas mais altas são causadas principalmente por atrito no processo de peletização (LARSSON et al., 2008). Desse modo, umidade inicial mais alta diminui o atrito, o que resulta em temperatura de matriz reduzida (FILBAKK et al., 2011) e em diminuição do gasto de energia elétrica.

Kaliyan e Morey (2009) afirmaram que quando a umidade é muito alta, a água permanece nas partículas e pode impedir o achatamento completo e a liberação de ligantes naturais no momento da peletização. Isso ocorre devido à incompressibilidade da água.

Em geral, existe um valor ótimo de umidade para a máxima dureza do *pellet*. A dureza do *pellet* aumenta com o aumento da pressão de compactação. Com o aumento da pressão, a densidade de *pellets* aumenta e se aproxima da densidade real, e a porosidade diminui. Porosidade mais baixa significa maior área de ligação, conseqüentemente, maior área de ligação resulta em *pellets* com maior dureza (HUANG et al., 2017).

O comprimento dos *pellets* é regulado de acordo com a altura das facas de corte. Dessa forma, a variação ocorre em função do local de rompimento do *pellet* ao sair da matriz de peletização e atingir a faca. Foi observado (Figura 11) que os valores médios de comprimento dos *pellets* não variaram muito, ficando entre 17,03 mm (tratamento 3, 80% de eucalipto) e

18,42 mm (Tratamento 4, 50% de eucalipto). Variação maior ocorreu dentro de cada tratamento.

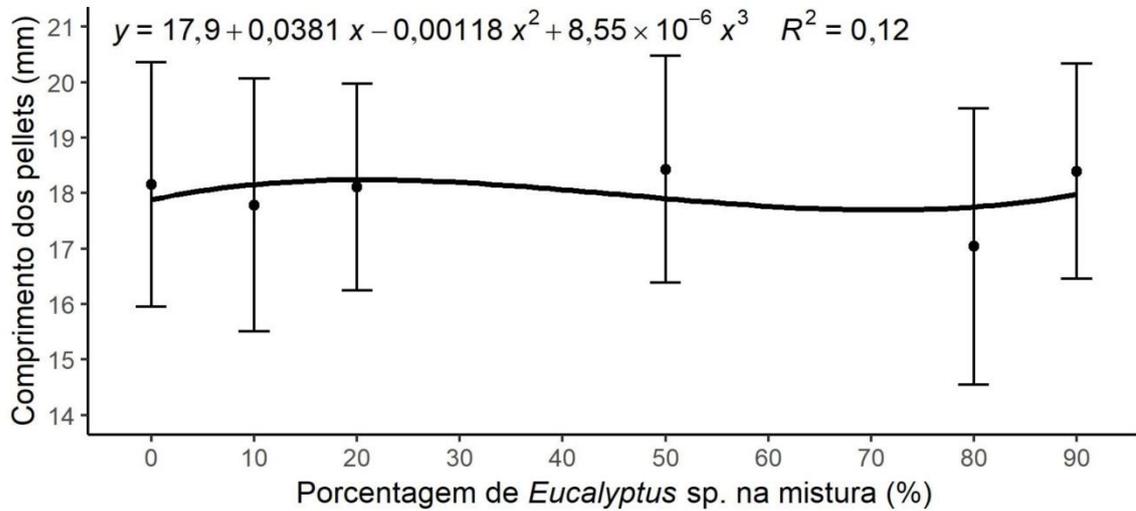


Figura 11 – Relação funcional entre o comprimento dos *pellets* e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Observa-se efeito significativo da porcentagem de eucalipto no diâmetro dos *pellets* (Figura 12), com variações médias correspondentes a 0,14 mm. Constatou-se que os tratamentos com menor umidade (90 e 80% de eucalipto) apresentaram menores valores de diâmetro, demonstrando que não houve expansão dos *pellets* após a peletização, pelo contrário, houve retração com valores de diâmetro de 5,92 e 5,90, respectivamente.

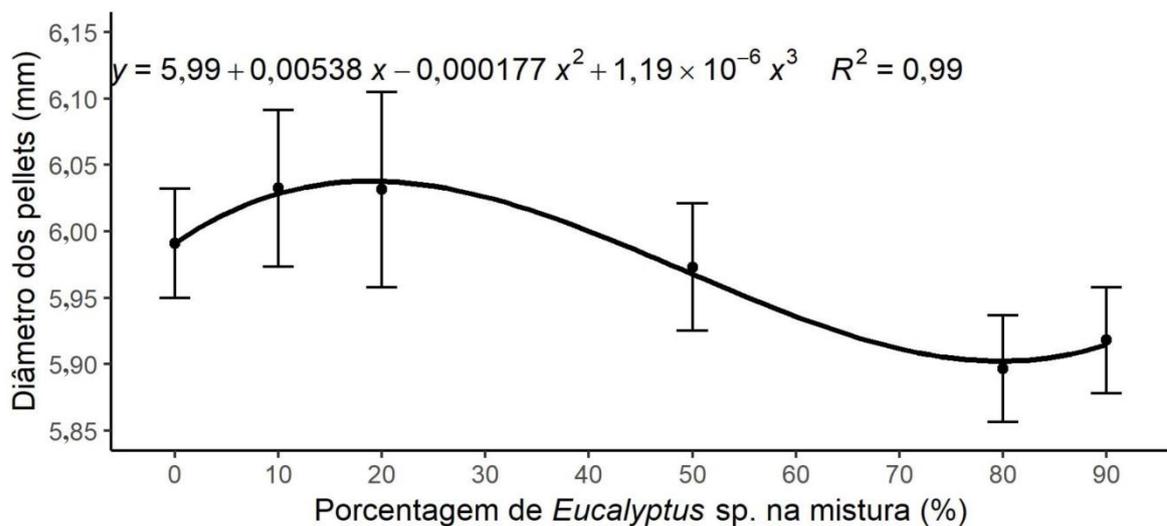


Figura 12 – Relação funcional entre o diâmetro dos *pellets* e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Variações no diâmetro dos *pellets* podem acarretar trincas e aumentar a geração de finos, afetando negativamente as propriedades mecânicas, além de aumento no risco de incêndios.

O tempo de retenção dos *pellets* na matriz de peletização influencia no diâmetro. Quanto, maior o tempo de retenção, menor expansão (TUMURULU et al., 2011), como verificado neste estudo.

Sabe-se que a madeira macia (conífera) necessita de matriz de compressão mais elevada do que a madeira dura (folhosa) para ser peletizada. Isso ocorre devido à elevada resistência do material duro a ser comprimido, tornando necessário um caminho mais curto por meio de um molde de compressão mais baixo. Holm et al. (2006) e Obernberger et al. (2010) relataram que a maior densidade e menor conteúdo de lignina encontrado nas madeiras duras faz com que, para produzir *pellets* com densidade adequada, sejam necessárias temperaturas e pressões mais altas e menor taxa de compressão (razão entre o comprimento do canal/diâmetro do canal).

Quanto à densidade a granel dos *pellets*, os resultados demonstraram efeito significativo da porcentagem de eucalipto na mistura (Figura 13). Verifica-se maiores valores de densidade a granel para tratamentos com maior porcentagem de eucalipto (90 e 80% de eucalipto), que coincidem com os tratamentos com menor densidade a granel da biomassa antes da peletização.

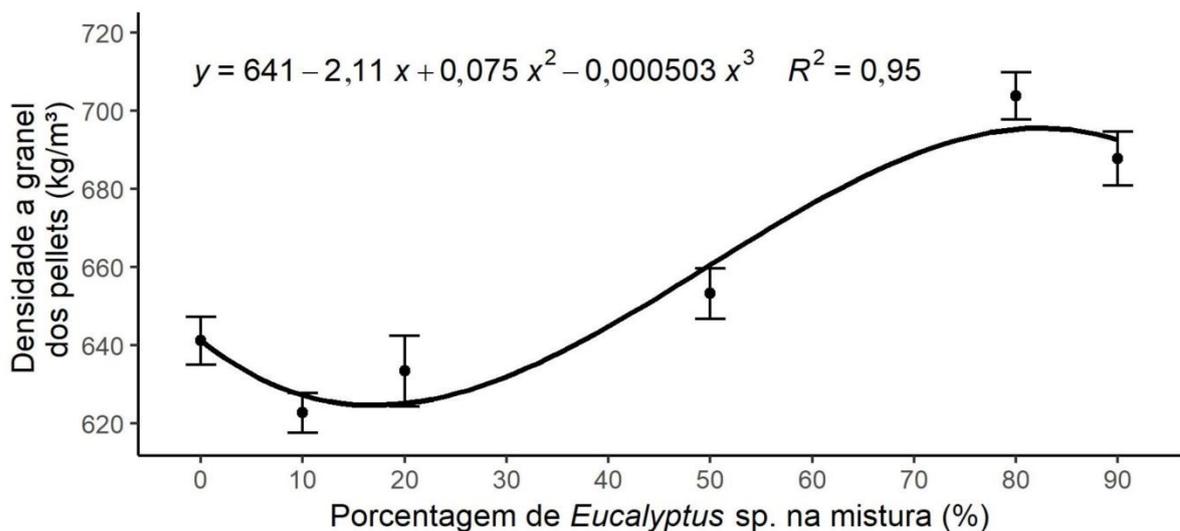


Figura 13 – Relação funcional entre a densidade a granel dos *pellets* e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Ainda nesse aspecto, é desejável obter maiores valores de densidade a granel, pois fatores como os custos com transporte e a densidade energética são essenciais na viabilidade econômica do uso da energia da biomassa, pois permite transportar maior quantidade de energia por unidade de volume (STELTE et al., 2011).

A densidade de energia indica a quantidade de energia armazenada por volume de material (SETTE et al., 2016). A densidade energética a granel é função da densidade a granel dos *pellets* e do PCS. Por isso, a densidade pode ser considerada o principal índice de qualidade para o uso energético dos combustíveis de biomassa, pois influencia diretamente a densidade energética (PROTÁSIO et al., 2015).

Desta forma, observou-se para a densidade energética a granel (Figura 14), padrão semelhante ao verificado para a densidade a granel.

A densidade energética a granel dos *pellets* se comportou de forma cúbica. Decresce até aproximadamente a proporção de 20% de eucalipto na mistura, cresce até próximo do tratamento com 80% de eucalipto e volta a decrescer até o tratamento com 90% de eucalipto.

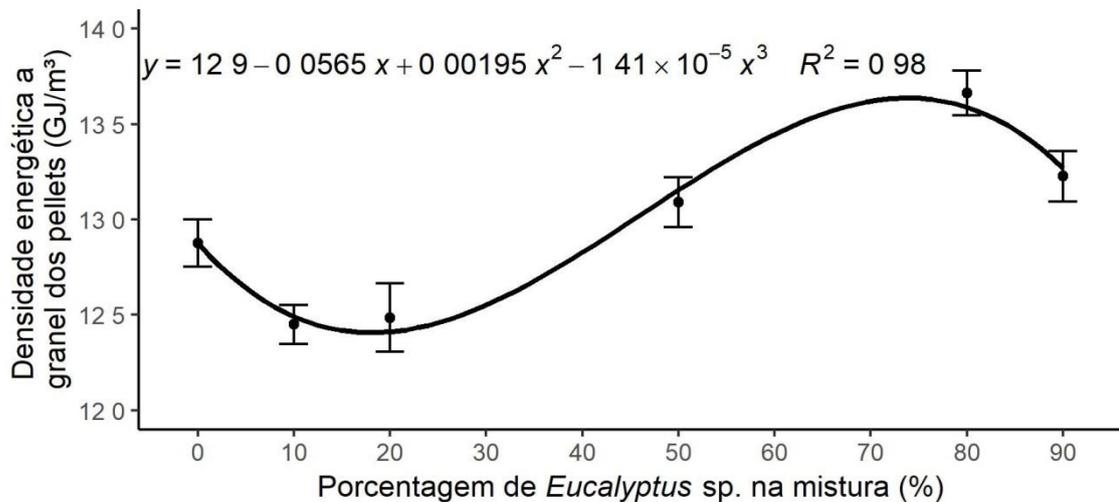


Figura 14 – Relação funcional entre a densidade energética a granel dos *pellets* e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Quanto à densidade unitária dos *pellets*, maiores valores foram verificados em relação à densidade a granel, uma vez que para cálculo da densidade unitária não são considerados os espaços vazios entre os *pellets*. Melhor adesão resulta em maior densidade unitária dos *pellets*, uma vez que eles se expandem menos em comparação aos *pellets* com má ligação entre as partículas.

A densidade unitária dos *pellets* foi influenciada significativamente de forma linear pela porcentagem de eucalipto na mistura (Figura 15). Como ocorrido para a densidade a

granel, os maiores valores de densidade unitária correspondem às proporções de 90 e 80% de eucalipto na mistura, com 1200,3 e 1213,3 kg.m⁻³, respectivamente.

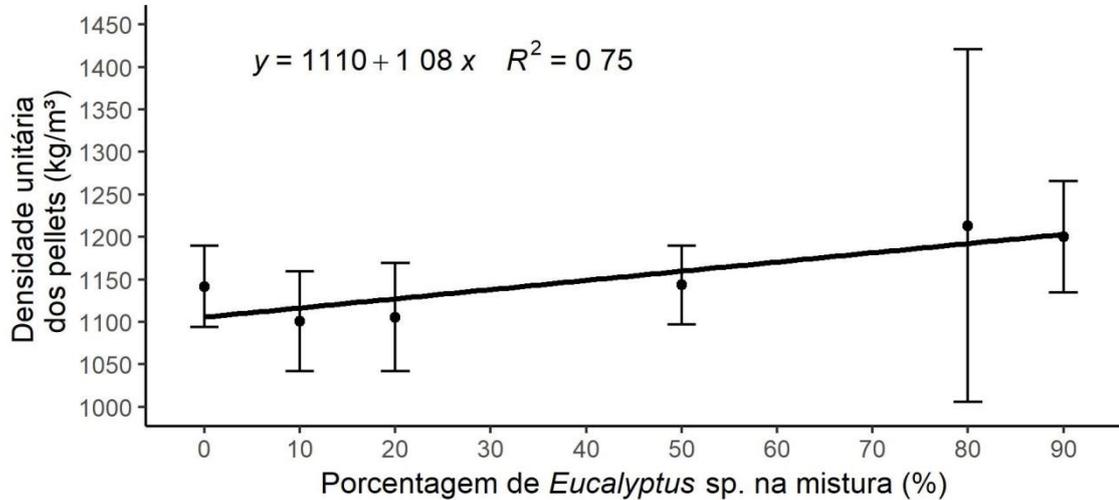


Figura 15 – Relação funcional entre a densidade unitária dos *pellets* e a de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Como a densidade energética a granel, a densidade energética unitária depende do PCS. Verifica-se na Figura 16, a curva ajustada para a densidade energética unitária dos *pellets*. O comportamento dessa propriedade foi semelhante ao da densidade energética a granel para todos os tratamentos.

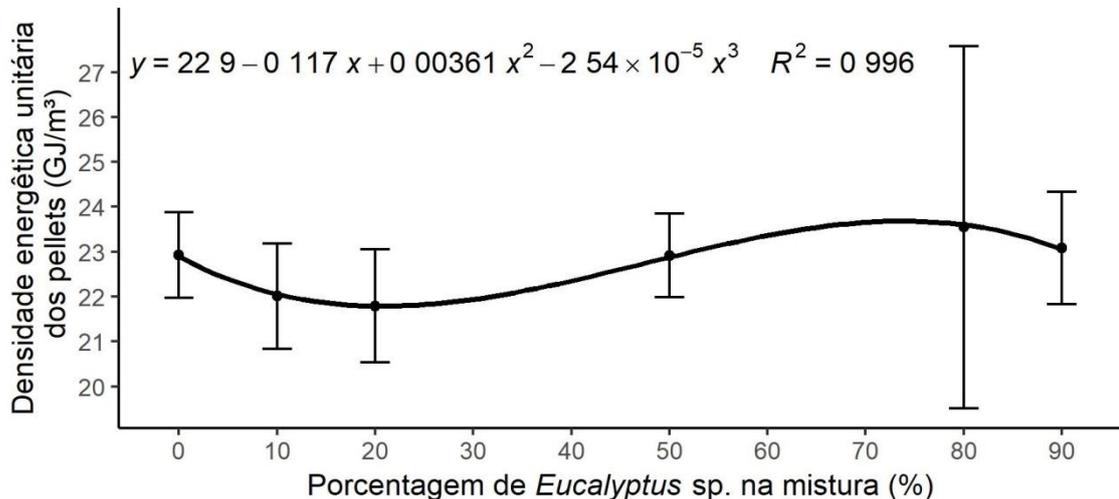


Figura 16 – Relação funcional entre a densidade energética unitária dos *pellets* e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Pellets com valores de densidade energética a granel e unitária superiores, têm influência direta no transporte e armazenamento, uma vez que combustíveis com maior densidade energética permitem otimizar o transporte, reduzindo custos e aumentando a

distância de transporte, além de armazenar maior quantidade de energia por volume durante longo período de tempo. Sendo assim, os tratamentos 2 e 3 (90 e 80% de eucalipto) merecem destaque pelos maiores valores médios obtidos, com 23,54 e 23,08 GJ.m⁻³, respectivamente.

Os valores médios da taxa de compactação dos tratamentos estão apresentados na Tabela 2. Nota-se maior taxa de compactação nos tratamentos 2 e 3, responsáveis pelas maiores porcentagens de eucalipto em sua composição e por as menores densidades a granel da biomassa antes da peletização.

De acordo com Protásio et al. (2011), quanto menor a densidade a granel da biomassa, maior será o aumento percentual de sua densidade após a compactação e conseqüentemente melhor será a acomodação das partículas.

Tabela 2 – Valores médios da taxa de compactação para cada tratamento.

Tratamentos	Porcentagem de Eucalipto	Taxa de Compactação
2	90	3,38
3	80	3,50
4	50	3,05
5	20	2,81
6	10	2,74
7	0	2,66

Fonte: Do autor (2018).

Quando ocorre maior compactação do material, a área de contato entre as partículas de biomassa é maior, conseqüentemente a massa por unidade de volume aumenta e, em geral, os *pellets* terão maior resistência mecânica (ZAMORANO et al., 2011; PEREIRA, 2014), como é possível verificar nas Figuras 17 e 18, que apresentam os resultados da durabilidade mecânica e dureza, respectivamente. Nota-se que os tratamentos responsáveis pela maior durabilidade e dureza são também os que apresentam maior taxa de compactação.

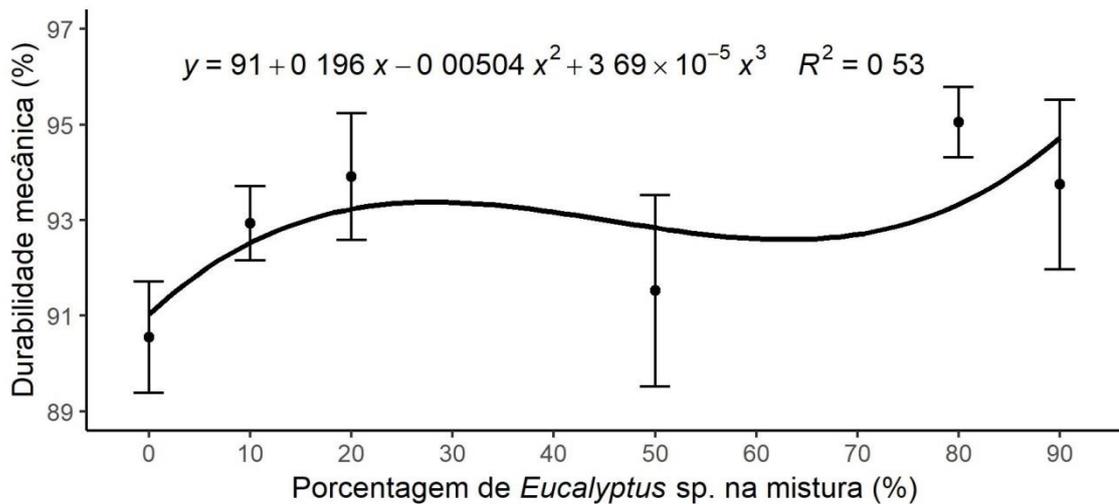


Figura 17 – Relação funcional entre a durabilidade mecânica dos *pellets* e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

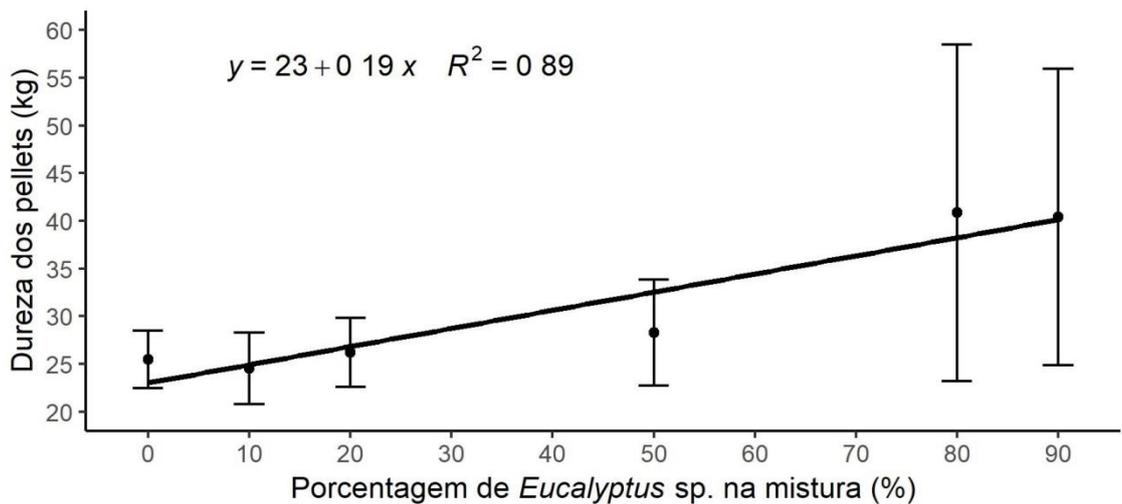


Figura 18 – Relação funcional entre a dureza dos *pellets* e a porcentagem de *Eucalyptus* sp. na mistura.

Quanto às propriedades mecânicas dos *pellets* produzidos, o teor de finos não apresentou efeito significativo da porcentagem de eucalipto na mistura de biomassas. O valor médio verificado neste quesito foi de 0,08%. Todos os valores encontrados estão abaixo do especificado pela norma ISO 17225-2 (2013), que permite até 1% de finos.

A geração de partículas menores e finos, tem implicação importante para a saúde e a segurança, e há até mesmo risco de explosões de poeira ao manusear e transportar grandes quantidades de *pellets*. Esta propriedade é extremamente dependente da durabilidade mecânica.

A durabilidade indica a integridade dos *pellets* durante o armazenamento e o transporte (TUMULURU, 2016). Os resultados da análise de regressão (Figura 17) indicam que a durabilidade mecânica se comportou de forma cúbica. Nota-se que a durabilidade obtida para o tratamento 3 (80% de eucalipto) foi superior ao tratamento 2 (90% de eucalipto), fato que pode ser justificado pela maior taxa de compactação e densidades desse tratamento.

Segundo Wongsiriamnuay e Tippayawong (2015), a densificação afeta as propriedades e a qualidade do combustível, e as variáveis controladas durante o processo (pressão, temperatura, velocidade, tempo) influenciam a densidade e a durabilidade do produto final. Altas temperaturas proporcionam maior durabilidade ao material adensado, mas exigem maior consumo de energia e maiores despesas operacionais.

A dureza, que está diretamente relacionada com a densidade a granel dos *pellets* (ZAMORANO et al., 2011), apresentou efeito significativo da porcentagem de eucalipto (Figura 18). De acordo com Zamorano et al. (2011) a dureza simula a compressão devido ao peso dos próprios *pellets* durante o armazenamento ou esmagamento durante o transporte. Nota-se que o aumento da dureza dos *pellets* em função do aumento da porcentagem de eucalipto ocorreu de forma linear.

As correlações entre os valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* estão apresentadas na Figura 19. Verifica-se que, as correlações destacadas em azul se correlacionam de forma positiva, enquanto as destacadas em vermelho tem correlação negativa.

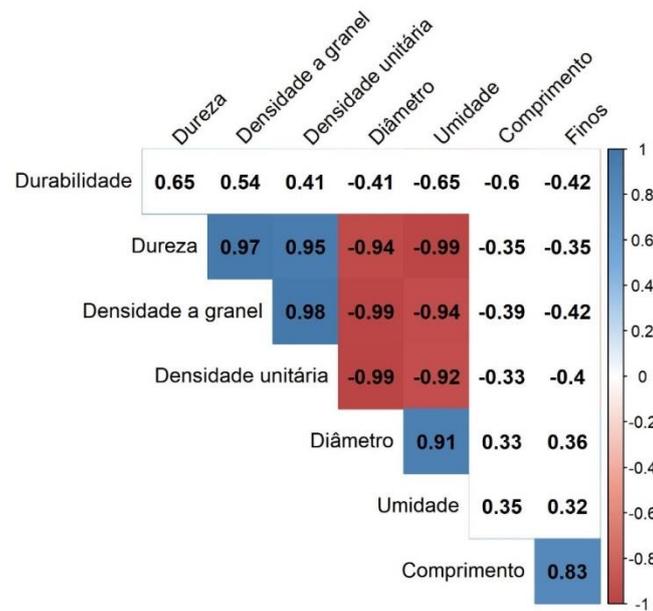


Figura 19 – Correlações entre os valores médios para as propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* a 5% de significância pelo teste T.

Nota-se que a dureza tem alta relação positiva com as densidades a granel e unitária e correlação negativa com o diâmetro e umidade.

A densidade a granel, como esperado apresenta alta relação diretamente proporcional com a densidade unitária. Em contrapartida está relacionada de forma negativa com o diâmetro e umidade dos *pellets*.

Ao comparar-se a densidade unitária com o diâmetro e umidade, observou-se uma relação inversamente proporcional entre as três propriedades.

O diâmetro por sua vez correlacionou-se positivamente com a umidade dos *pellets*.

Comparando-se o comprimento dos *pellets* com a geração de finos, foi observada correlação positiva.

4 CONCLUSÕES

A matéria-prima utilizada mostrou-se apta a produção de *pellets* para exportação quanto às rigorosas exigências de teores de cinzas e cloro, as quais representam grande entrave para utilização de determinadas biomassas.

Os tratamentos com maior porcentagem de eucalipto apresentaram os melhores resultados, principalmente quanto às propriedades mecânicas, apesar de nenhum tratamento ter conseguido atender as normas internacionais quanto à durabilidade mecânica. Isso demonstra que a peletização do eucalipto necessita de alguns ajustes no processo e condicionamento da matéria-prima, mas é viável para a peletização.

O melhor tratamento observado em termos de densidade e características mecânicas foi o tratamento 3, produzido com 80% de eucalipto e 20% de pinus.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D1762-84: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International. 2 p. 2007.

_____. ASTM E711-87: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia: ASTM International. 8 p. 2004.

BIRDSEY, R.; DUFFY, P.; SMYTH, C.; KURZ, W.A.; DUGAN, A.J.; HOUGHTON, R. Climate, economic, and environmental impacts of producing wood for bioenergy. *Environ. Res. Lett.*, 2018.

CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of *pellets* from energy crops and cereal straws. *Biosystems Engineering*, v. 112, n. 2, p. 151-159, 2012.

CASTELLANO, J. M.; GÓMEZ, M.; FERNÁNDEZ, M.; ESTEBAN, L. S.; CARRASCO, J. E.. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *Fuel*. Volume 139, p. 629-636, 2015.

CAVALETT, O.; SLETTMO, S. N.; CHERUBIN, F. Energy and Environmental Aspects of Using Eucalyptus from Brazil for Energy and Transportation Services in Europe. *Sustainability*. 10(11), 4068, 2018.

CORDERO, T.; MARQUEZ, F.; RODRIGUEZ-MIRASOL, J.; RODRIGUEZ, J. J.. **Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis.** *Fuel*, 11, pp. 1567-1571, 2001.

CORNWALL, W. Is wood a green source of energy? Scientists are divided. *Science*. 355, 18–21. 2017.

COUTO, L.C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L.F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. *Biomassa & Energia*, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.

DALE, V. H.; KLINE, K. L.; PARISH, E. S.; COWIE, A. L.; EMORY, R.; MALMSHEIMER, R. W.; SLADE, R.; SMITH, C. T., J.; WIGLEY, T. B.; BENTSEN, N. S. Status and prospects for renewable energy using wood pellets from the southeastern United States. *Gcb Bioenergy*, 9, 1296–1305, 2017.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Conversion and Management*, v. 42, n. 2, p. 183-188, 2001.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14774-1**: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method. Berlin: CEN, p. 10, 2010.

_____. **DIN EN 15210-1**: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets. Berlin: CEN, p. 12, 2010.

_____. **DIN EN 16127**: Determination of length and diameter of pellets. Berlin: CEN, p. 11, 2012.

ESCOBAR, J. F. A produção sustentável de biomassa florestal para energia no brasil: o caso dos pellets de madeira. *Tese* (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

EU. Directive 2016/0382. **DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL** on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Brussels, COM,

2016. Disponível em:

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_en_act_part1_v7_1.pdf. Acesso: 04 jun 2018.

EUFRADE, H. D. J. J.; MELO, R. X. D.; SARTORI, M. M. P.; GUERRA, S. P. S.; BALLARIN, A.W. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. *Biomass Bioenergy* **2016**, *90*, 15–21.

FILBAKK, T.; SKJEVRAK, G.; HOIBO, O.; DIBDIAKOVA, J.; JIRJIS, R. **The influence of storage and drying methods for Scots pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters**. *Fuel Process. Technol.*, *92* (5), pp. 871-878, 2011.

FILBAKK, T.; Jirjis, R.; NURMI, J.; HOIBO, O. The effect of bark content on quality parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*, *35*, pp. 3342-3349, 2011.

GILLESPIE, G. D.; EVERARD, C. D.; FAWANGAN, C. C.; MCDONNELL, K. P. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. *Fuel*, v. 111, p. 771-777, 2013.

GOMINHO, J.; LOURENÇO, A.; MIRANDA, I.; PEREIRA, H. **Chemical and fuel properties of stumps biomass from Eucalyptus globulus plantations**. *Ind. Crops Prod.*, *39*, pp. 12-16, 2012.

HANSTED, A. L. S.; NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; YAMAMOTO, H.; YAMAJI, F. M. Comparative analyses of fast growing species in different moisture content for high quality solid fuel production. *Fuel* *184*, 180–184, 2016.

HOLM, J. K.; HENRIKSEN, U. B.; HUSTAD, J. E.; SORENSEN, L. H. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellet production. *Energy and Fuels*, pp. 2686-2694, 2006.

HUANG, Y.; FINELL, M.; LARSSON, S.; WANG, X.; ZHANG, J.; WEI, R.; LIU, L. Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. *Biomass and Bioenergy*. Volume 98, p. 8-14, 2017.

JUNGINGER, M.; BOLKESJO, T.; BRADLEY, D.; DOLZAN, P.; FAAIJ, A.; HEINIMO, J.; HEKTOR, B.; LEISTAD, O.; LING, E.; PERRY, M. Developments in international bioenergy trade. *Biomass Bioenergy*, *32*, 717–729. 2008.

JUNGINGER, M.; VAN DAM, J.; ZARRILLI, S.; MOHAMED, F. A.; MARCHAL, D.; FAAIJ, A. Opportunities and barriers for international bioenergy trade. *Energy Policy*, *39*, 2028–2042. 2011.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V.. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy*, *33* (3), pp. 337-359, 2009.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 3, p. 1082-1090, 2010.

KEENE, W. C., A. A. P. PSZENNY, J. M. GALLOWAY, AND M. E. HAWLEY. Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation, *J. Geophys. Res.*, *91*(D6), 6647-6658, 1986.

LAMERS, P.; JUNGINGER, M.; HAMELINCK, C.; FAAIJ, A. Developments in international solid biofuel trade—An analysis of volumes, policies, and market factors. *Renew. Sustain. Energy Rev.* *16*, 3176–3199. 2012.

- LARSSON, S. H.; THYREL, M.; GELADI, P.; LESTANDER, T. A. **High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials**. *Bioresource Technology*, 99, pp. 7176-7182, 2008.
- LI, Y.; LIU, H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. **Biomass and Bioenergy**, 19, pp. 177-186, 2000.
- MARAVAR, A. G.; RODRIGUEZ, M. L.; SERRANO-BERNARDO, F.; DIAZ, L. F.; ZAMORANO, M. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. **Fuel Processing Technology**. Volume 129, Pages 1-7, 2015.
- MELLO, W. Z.; Precipitation chemistry in the coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil. **Environmental Pollution**. V. 114, p. 235-242. 2001.
- MONEDERO, E.; PORTERO, H.; LAPUERTA, M. Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. **Fuel Processing Technology** 132, 15–23, 2015.
- MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Amsterdam, v. 47, p. 232–240, 2013.
- OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook: the production and thermal utilization of biomass pellet**, London, 2010.
- PAULA, L. E. R. et al. **Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation**. *Cerne, Lavras*, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- PEREIRA, B. L. Propriedades de pellets de diferentes biomassas para fins energéticos. 2014. 73f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; CANAL, W. D. Influência da adição de lignina kraft nas propriedades de pellets de eucalipto. **FLORESTA**, v. 46, n. 2, p. 235 - 242, 2016.
- PODDAR, S. et al. Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: higher heating value. **Fuel**, London, v. 131, p. 43-48, 2014.
- PORSÖ, C.; HAMMAR, T.; NILSSON, D.; HANSSON, P. A. Time-dependent climate impact and energy efficiency of internationally traded non-torrefied and torrefied wood pellets from logging residues. *BioEnergy Res.* 11, 139–151, 2018.
- PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n. 68, p.273-283, 2011.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; SIQUEIRA, H. F.; MELO, I. C. N. A.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES, J. B. J.. Caracterização energética de *pellets in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 435-442, 2015.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- RICHARDSON, J.; BJÖRHEDEN, R.; HAKKILA, P.; LOWE, A. T.; SMITH, C. T. Bioenergy from sustainable forestry: Guiding principles and practice. **Forestry Sciences**. v.71. Kluwer Academic Publishers, 364p., 2002.
- RILEY, J. P.; CHESTER, R. **Introduction to marine chemistry**. Academic Press, London and New York. xiv 465 p. 1971.
- ROBERTSON, G. P.; HAMILTON, S. K.; BARHAM, B. L.; DALE, B. E.; IZAURRALDE, R. C.; JACKSON, R. D.; LANDIS, D. A.; SWINTON, S. M.; THELEN, K. D.; TIEDJE, J. M. Cellulosic biofuel contributions to a sustainable energy future: Choices and outcomes. **Science**, 356, 2017.
- SAMUELSSON, R.; LARSSON, S. H.; THYREL, M.; LESTANDER, T. A.. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. **Appl. Energy**, pp. 109-115, 2012.
- SCHLESINGER, W. H. Are wood pellets a green fuel? **Science**. 359, 1328–1329. 2018.
- SETTE, C. R. J.; FREITAS, P. C.; FREITAS, V. P.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. A. Production and characterization of bamboo pellets. **Rev. Biosci.** J. 32, 922–930. 2016.
- SETTE, C. R. J.; HANSTED, A. L. S.; NOVAES, E.; LIMA, P. A. F.; RODRIGUES, A. C.; SANTOS, D. R. S.; YAMAJI, F. M.. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops & Products** 122, 209–213, 2018.
- SIQUEIRA, H. F. Efeito de aditivos na qualidade de *pellets* de madeira para uso energético. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. **A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources**. 35 (2), pp. 910 – 918, 2011.
- SHEN, J.; ZHU, S.; LIU, H.; ZHANG, J.; TAN, J.. **The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis**. Energy Convers. Manage., 5, pp. 983-987. 2010.
- STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic Chemistry – An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters**, John Wiley & Sons p. 583, New York, 1970.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, T. A. P. P. I. **TAPPI T 204 cm-97**. Solvent extractives of wood and pulp. 1997, 4 p.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, T. A. A. P. I. **TAPPI T 222 om-02**. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2002, 5 p.
- TELMO, C.; LOUSADA, J.. **Valores de aquecimento de pellets de madeira de diferentes espécies**. Biomassa Bioenergia, 35, pp. 2634 – 2639, 2011.
- TUMULURU, J. S. et al. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.
- TUMULURU, J. S. **Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover**. Biosyst. Eng., 119, pp. 44-57, 2014.
- TUMULURU, J. S. High moisture corn stover pelleting in a flat die pellet mill fitted with a 6 mm die: physical properties and specific energy consumption. **Energy Sci. Eng.**, 3, pp. 327-341, 2015.

TUMULURU, J. S.; CONNER, C. C.; HOOVER, A. N. **Method to produce durable pellets at lower energy consumption using high moisture corn stover and a corn starch binder in a flat die pellet mil.** J. Vis. Exp., p. e54092, 2016.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **Handbook of Biomass Combustion and Co-firing.** London, UK: Earthscan, p. 442, 2008.

ZAMORANO, M.; POPOV, V.; RODRÍGUEZ, M. L.; GARCÍA-MARAVÉ, A. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. **Renewable Energy**, v. 36, n. 11, p. 3133-3140, 2011.

WHITTAKER, C.; SHIELD, I. **Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – a review.** Renew. Sust. Energ. Rev., 71, pp. 1-11, 2017.

WONGSIRIAMNUAY, T; TIPPAYAWONG, N. **Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets.** Biosyst Eng, 139, p.111–20, 2015.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Resumo das análises de variância para a umidade (base seca), teores de extrativos, lignina, holocelulose, cinzas, densidade a granel, materiais voláteis e carbono fixo das misturas de biomassa.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio							
		Umidade b.s.*	Lignina*	Extrativos*	Holocelulose*	Cinzas Estrutural*	Densidade granel biomassa*	Materiais voláteis*	Carbono Fixo*
Proporção da mistura	6	13,2326	12,9295	10,497	30,9312	0,056111	934,86	4,4292	4,0127
Resíduo	14	0,0742	0,8065	0,082	0,8805	0,006808	29,33	0,6246	0,6445
Média geral		13,52	28,19	13,89	57,47	0,44	213,90	84,11	15,48
Coeficiente de variação (%)		2,5 %	3,19%	2,06 %	1,63 %	18,79%	2,53%	0,95%	5,02 %

*Significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE B – Resumo das análises de variância para poder calorífico superior das misturas de biomassa.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
		Poder Calorífico*
Proporção da mistura	6	0,48011
Resíduo	7	0,04841
Média geral		19,92
Coeficiente de variação (%)		1,13 %

*Significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE C – Resumo das análises de variância para diâmetro, comprimento, densidade unitária e energética unitária dos *pellets* produzidos.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio			
		Diâmetro*	Comprimento*	Densidade unitária*	Densidade energética unitária*
Proporção da mistura	5	0,32291	26,9712	220540	45,028
Resíduo	594	0,00267	4,6029	9879	3,755
Média geral		5,97	17,99	1150,86	23,75
Coeficiente de variação (%)		0,87 %	11,93 %	8,64%	8,53 %

*Significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE D – Resumo das análises de variância para umidade (base seca), finos e durabilidade mecânica dos *pellets* produzidos.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio		
		Umidade b.s.*	Finos**	Durabilidade*
Proporção da mistura	5	31,787	0,0040238	8,2502
Resíduo	12	0,127	0,0026694	1,9022
Média geral		6,79	0,08	92,95
Coeficiente de variação (%)		5,37 %	66,1 %	1,48 %

*Significativo a 95% de probabilidade; **Não significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE E – Resumo das análises de variância para densidade a granel e densidade energética a granel dos *pellets* produzidos.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	
		Densidade a granel*	Densidade energética a granel*
Proporção da mistura	5	6157,5	1,2876
Resíduo	30	45,3	0,0176
Média geral		654,66	12,92
Coeficiente de variação (%)		1,02 %	1,02%

*Significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE F – Resumo das análises de variância para a dureza dos *pellets* produzidos.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
		Dureza
Proporção da mistura	5	1438,46
Resíduo	144	103,09
Média geral		30,96
Coeficiente de variação (%)		32,8 %

*Significativo a 95% de probabilidade.

ARTIGO II

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE LIGNINA KRAFT NAS PROPRIEDADES DE PELLETS PRODUZIDOS A PARTIR DE MISTURA DE *EUCALYPTUS* SP. E *PINUS* SP.

RESUMO

A utilização da biomassa em larga escala requer transformações no sentido de contornar suas características indesejadas, como a baixa densidade energética do material *in natura*. A densificação na forma de *pellets* pode efetivamente levar à forma desejada e aumentar a densidade de energia da biomassa, tornando-a conveniente para o transporte, armazenamento e utilização. Além disso, *pellets* podem ser amplamente utilizados em caldeiras industriais para pirólise, gaseificação, combustão direta ou *cofiring* com carvão. Devido às inúmeras vantagens de utilização dos *pellets*, o mercado consumidor se encontra em plena expansão e é extremamente exigente quanto à qualidade do produto. A utilização de aditivos pode melhorar a qualidade dos *pellets* como, por exemplo, a lignina kraft, resíduo da indústria de papel e celulose, aplicando o conceito de biorrefinaria, em que todos os componentes de biomassa são totalmente utilizados para produzir uma gama de produtos de maior valor agregado. O objetivo do trabalho foi avaliar a influência do uso do aditivo lignina kraft, em diferentes quantidades, na qualidade de *pellets* produzidos com madeira de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. Foi utilizada a proporção de 50% eucalipto e 50% pinus. Excluindo-se a testemunha (0% de lignina), foram avaliadas as adições de 1, 2 e 4% de lignina kraft, em relação à massa seca da matéria-prima. Os *pellets* foram produzidos em prensa peletizadora laboratorial com matriz circular horizontal. Foi realizada a caracterização da mistura de biomassa e da lignina quanto à densidade a granel, umidade base seca, poder calorífico superior e análise química imediata. Para a mistura de biomassa foram quantificados teor de extrativos, lignina total e holocelulose. Foram avaliadas as seguintes propriedades dos *pellets*: umidade, poder calorífico superior, comprimento e diâmetro, densidade a granel e unitária, densidade energética a granel e unitária, teor de cinzas, teor de finos, durabilidade mecânica e dureza. A adição de lignina ocasionou a elevação da umidade dos *pellets*. Também contribuiu para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas, no que diz respeito à densidade, durabilidade mecânica e dureza. Conclui-se que a adição de lignina para produção de *pellets* é viável, principalmente quando se deseja melhorar as características mecânicas desse biocombustível.

Palavras-chave: Biocombustível sólido. Aglutinante. Compactação da biomassa. Resistência mecânica

ABSTRACT

The use of biomass on a large scale requires transformations in order to overcome its undesired characteristics, such as the low energetic density of the material in natura. The densification in the form of pellets can effectively lead to the desired shape and increase the biomass energy density, making it convenient for transportation, storage and use. In addition, pellets can be widely used in industrial boilers for pyrolysis, gasification, direct combustion or cofiring with coal. Due to the numerous advantages of using pellets, the consumer market is in full expansion and is extremely demanding as to the quality of the product. The use of additives can improve the quality of pellets such as kraft lignin, waste from the pulp and paper industry by applying the concept of biorefinery where all biomass components are fully utilized to produce a range of higher added value. The objective of this work was to evaluate the influence of the use of kraft lignin additive, in different quantities, on the quality of pellets produced with *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp. The proportion of 50% eucalyptus and 50% pinus was used. Excluding the control (0% lignin), the additions of 1, 2 and 4% of kraft lignin were evaluated in relation to the dry mass of the raw material. The pellets were produced in laboratory pelletizing press with horizontal circular matrix. The biomass and lignin mixture characterization was performed for bulk density, dry basis moisture, higher calorific value and immediate chemical analysis. For the biomass mixture, extractive content, total lignin and holocellulose were quantified. The following properties of the pellets were evaluated: moisture, upper calorific value, length and diameter, bulk and unit density, bulk and unit energy density, ash content, fines content, mechanical durability and hardness. The addition of lignin caused an increase in the moisture content of the pellets. It has also contributed to the improvement of physical and mechanical properties with regard to density, mechanical durability and hardness. It is concluded that the addition of lignin for the production of pellets is feasible, especially when it is desired to improve the mechanical characteristics of this biofuel.

Keywords: Solid biofuel. Binder. Biomass compaction. Mechanical resistance

1 INTRODUÇÃO

A economia mundial ainda é fortemente dependente de combustíveis fósseis, no entanto, os preços instáveis e a necessidade de reduzir as emissões de gases poluentes vêm promovendo o uso de fontes renováveis de energia. Assim, o uso da biomassa e resíduos em geral na produção de energia desempenha papel importante neste cenário, reduzindo o uso de combustíveis não renováveis, sendo, o mesmo, apresentado como método sustentável (ZABANIOTOU et al., 2014).

A bioenergia tem sido promovida por meio de várias políticas em todo o mundo como opção promissora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis (REN21, 2012). Com destaque para os países europeus, que pretendem aumentar a quota de energias renováveis no seu consumo final bruto de energia para 20% até 2020.

Processos de conversão da biomassa, por meio da densificação, segundo Ferreira et al. (2015), fornecem uma série de vantagens quando comparados à queima direta. Aumento da densidade de energia por unidade de volume, manuseio, transporte e armazenamento mais fáceis, combustão melhorada, menor emissão de partículas, baixa volatilidade, menor tamanho, maior densidade e qualidade uniforme são algumas das vantagens da densificação da biomassa (YANK et al., 2016). Além disso, em contraste com outros combustíveis à base de madeira, devido à forma homogênea dos *pellets*, é possível a alimentação automática para fogões e caldeiras (WHITTAKER e SHIELD, 2017).

As vantagens em relação ao uso de biocombustíveis sólidos são ambientais, sociais e econômicas, uma vez que as matérias-primas utilizadas para produzi-las são a biomassa natural oriunda da agroindústria. Ao mesmo tempo, esta abordagem diversifica a matriz energética, melhora a segurança energética, gera empregos e renda (VASSILEV et al., 2015; BASSO et al., 2016).

Devido à expansão do comércio e uso de *pellets* em escala residencial, o aumento na demanda por *pellets* de alta qualidade forçará os produtores a manter as propriedades exigidas e a ampliar a base de matérias-primas. A maioria dos *pellets*, no entanto, são transportados a granel em grandes embarcações e caminhões, o que impõe exigências igualmente severas por *pellets* de qualidade premium (STÅHL et al., 2016).

Pellets de madeira devem atender a alguns padrões de qualidade para serem considerados produto homogêneo. Além disso, a normalização deve garantir a quantidade e qualidade de energia requerida nos sistemas de geração para os quais este produto será

destinado. A padronização das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos *pellets* é fator de extrema importância, tanto para emissão de laudos de qualidade nacional, que muitas vezes são requeridos pelos próprios consumidores, quanto para o mercado internacional, que investe cada vez mais na importação de resíduo florestal compactado (SPANHOL et al., 2015).

A qualidade final dos *pellets* varia dependendo das propriedades da matéria-prima e do processo de fabricação. As variáveis dependentes do processo de peletização podem ser controladas para otimizar a eficiência da produção e melhorar a qualidade do produto acabado de acordo com a biomassa utilizada.

A qualidade dos *pellets* também pode ser melhorada por meio da utilização de aditivos com propriedades adesivas à matéria-prima. Eles são adicionados para melhorar as propriedades de combustão, melhorar a durabilidade ou reduzir o desgaste da matriz de *pellets* (LUNA et al., 2014; NEVES et al., 2016), o que pode ajudar a reduzir as emissões líquidas de gases durante o processo produtivo, reduzindo as perdas e diminuindo a necessidade de energia (SIGNURIŠIĆ-MLADENOVIĆ e ŠKRBIĆ, 2016).

A lignina, já identificada como um dos principais determinantes da durabilidade do *pellet*, pode ser adicionada às matérias-primas. Como ligante natural, a lignina desempenha papel fundamental na ligação das partículas durante o processo de peletização da biomassa com base em suas características de transição térmica (NIELSEN et al., 2010). Subsequentemente se liga à celulose, hemiceluloses e outros componentes da biomassa em resposta à aplicação de pressão. Portanto, tanto a temperatura quanto o teor de lignina são os principais fatores que influenciam a extensão da ligação entre as partículas de madeira durante o processo de peletização.

A lignina kraft obtida do aproveitamento do licor negro, resíduo da produção de polpa celulósica pode ser utilizada como aditivo para *pellets*, podendo contribuir para melhoria das propriedades mecânicas e energéticas dos mesmos.

Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar a influência da adição de lignina kraft, em diferentes quantidades, na qualidade de *pellets* produzidos com partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e preparo da matéria-prima

Utilizou-se como matéria-prima para a execução do trabalho, partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., com dimensões próximas a 5 milímetros. O material foi cedido pela empresa Biofogo, localizada em Ressaquinha – MG.

As partículas de *Eucalyptus* sp. são provenientes do processamento mecânico de espécies comerciais encontradas na região da empresa e foram obtidas a partir da madeira sem casca, enquanto que as partículas de *Pinus* sp. são provenientes de resíduos de serrarias também localizados na região.

A proporção das biomassas utilizadas foi 50% *Eucalyptus* sp. e 50% *Pinus* sp.

A lignina kraft foi doada por uma empresa de papel e celulose da região, sendo obtida na sua forma sólida, a partir do licor negro do processo de polpação kraft de eucalipto. Utilizou-se como aditivo na produção dos *pellets*, excluindo a testemunha (0% de lignina), nas quantidades de 1, 2 e 4% em relação à massa seca da matéria-prima.

Após a coleta da matéria-prima, foram preparados 4 (quatro) tratamentos descritos na Tabela 1, em relação a porcentagem de lignina kraft adicionada. Posteriormente, a umidade dos tratamentos foi ajustada para 23% (base seca). Esse valor foi determinado de acordo com as características da mistura das biomassas utilizadas e do aspecto visual de *pellets* produzidos em testes preliminares.

Tabela 1 – Percentagens de biomassas e lignina kraft utilizadas.

Tratamentos	Composição dos tratamentos (base seca)		
	<i>Eucalyptus</i> sp. (%)	<i>Pinus</i> sp. (%)	Lignina Kraft (%)
I	50,0	50,0	0
II	49,5	49,5	1
III	49,0	49,0	2
V	48,0	48,0	4

2.2 Caracterização da matéria-prima

Foram analisadas a mistura entre as partículas de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. (50% eucalipto e 50% pinus), e a lignina, quanto às seguintes características: umidade base seca, densidade a granel, química imediata, teor de extrativos, lignina total e poder calorífico superior.

A umidade, base seca, foi determinada de acordo com a norma DIN EN 14774-1 (Deutsches Institut Für Normung, 2010), em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, considerando três repetições.

A determinação da densidade a granel da mistura (50% eucalipto/50% pinus) e da lignina kraft foi realizada por meio da utilização de uma proveta de 100 cm^3 preenchida com a amostra. A proveta preenchida foi pesada em balança com precisão de 0,1 g. A densidade a granel foi calculada pela razão entre a massa obtida e o volume da amostra (100 cm^3). Foram realizadas três repetições por tratamento.

A análise química imediata foi realizada visando a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e, por diferença, carbono fixo, conforme procedimento descrito na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2007). O ensaio foi realizado com três repetições.

Os teores de extrativos foram determinados, de acordo com a norma TAPPI 204 cm-97 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1997). A lignina total foi determinada seguindo os procedimentos da norma TAPPI T 222 om-02 (TAPPI, 2002).

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido de acordo com a norma da ASTM E711-87 (ASTM, 2004), utilizando-se bomba calorimétrica adiabática marca IKA® modelo 300. A fração de serragem utilizada foi a que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh. A determinação foi obtida em duplicata. Antes dos ensaios as amostras foram secas em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até massa constante antes da determinação.

2.3 Processo de peletização

Os *pellets* foram produzidos em prensa peletizadora laboratorial da marca Amandus Kahl, modelo 14-175, com capacidade para produção de $30\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ e matriz plana horizontal com canais de 6 mm de diâmetro. Para alimentação da peletizadora, foi utilizado um sistema composto por motor elétrico, controlador de velocidade e rosca sem fim. A temperatura de

peletização variou de 95 a 100°C e a velocidade de rotação dos roletes foi de 1500 rpm. Ao longo da rosca-sem-fim foram instalados quatro bicos de injeção de vapor produzido por uma autoclave.

Foram produzidos aproximadamente 3 (três) kg de *pellets* por tratamento. Após a produção, os *pellets* foram acondicionados em sacos plásticos até a realização dos ensaios.

2.4 Propriedades dos *pellets*

A umidade, base seca, foi determinada de acordo com a norma DIN EN 14774-1 (Deutsches Institut Für Normung, 2010), em estufa a $103\pm 2^\circ\text{C}$, considerando três repetições.

A determinação da densidade a granel dos *pellets* foi realizada por meio da utilização de recipiente de volume conhecido preenchido com a amostra. O recipiente preenchido foi pesado em balança com precisão de 0,01 g. A densidade a granel foi calculada pela razão entre a massa obtida e o volume da amostra. Foram realizadas três repetições por tratamento.

A densidade aparente unitária dos *pellets* foi determinada utilizando o método estereométrico, ou seja, o volume foi calculado considerando a forma cilíndrica dos *pellets* e a massa obtida com o uso de balança analítica com precisão de 0,01 g. Foram amostrados aleatoriamente 100 (cem) *pellets* por tratamento.

O diâmetro (mm) e comprimento (mm) dos *pellets* foram obtidos conforme a norma DIN EN 16127 (Deutsches Institut Für Normung, 2012), utilizando-se de paquímetro digital. Foram considerados 100 (cem) *pellets* por tratamento.

A durabilidade mecânica e a porcentagem de finos (partículas menores que 3,15 mm) foram determinadas utilizando o equipamento Ligno-Tester, Holmen®, conforme a norma DIN EN 15210-1 (DIN, 2010b). Para tanto, amostras de *pellets* foram ventiladas por meio de jato de ar que simula a destruição natural dos *pellets* durante o transporte e manuseio. Para a determinação da porcentagem de finos, o fluxo de ar tem pressão de 30 mbar e duração de 30 segundos. Posteriormente, as amostras sem finos foram submetidas a outro fluxo de ar controlado (70 mbar) durante 60 segundos para determinação da durabilidade mecânica. Foram realizadas três repetições por tratamento.

A dureza, em kg, foi determinada pelo ensaio em durômetro manual com escala de 0 a 100 kg, da marca Amandus Kahl. Um *pellet*, por vez, foi inserido no durômetro com carga crescente até fratura da amostra. Foram considerados 25 *pellets* por tratamento.

2.5 Análise Estatística

As matérias-primas foram analisadas segundo delineamento inteiramente casualizado (DIC), com dois tratamentos (mistura entre *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. e lignina) e três repetições.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), para verificação das diferenças existentes entre os tratamentos pelo Teste F, a 5% de significância.

Para avaliar as propriedades dos *pellets* produzidos, o experimento também foi instalado segundo delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (mistura entre *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. com adição de 0, 1, 2 e 4% de lignina kraft, respectivamente).

Após os resultados serem submetidos à análise de variância (ANOVA), pelo Teste F a 5% de significância, ajustou-se o modelo adequado levando em consideração o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão residual e a distribuição gráfica dos resíduos, quando estabelecido diferenças significativas entre os tratamentos.

As variáveis analisadas apresentaram número de repetições variadas, pois cada análise foi realizada por meio de métodos laboratoriais específicos.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R, versão R version 3.5.1. (R Foundation for Statistical Computing, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da matéria-prima

A Tabela 2 apresenta os valores médios da caracterização das propriedades da mistura e da lignina kraft, usada como aditivo para a produção dos *pellets*.

A umidade da lignina kraft foi significativamente menor em relação à mistura de biomassa utilizada. Isso ocorre, devido à composição química da lignina, que é formada por unidades de fenilpropano e apresenta, em sua estrutura, ligações C-C e C-O-C (ZHU, 2013).

Observa-se que a densidade a granel da lignina kraft foi maior que a das partículas de madeira. Este fato pode ser justificado pela diferença entre a granulometria dos materiais. A lignina estava em pó, numa granulometria bem menor que a mistura de madeira. Logo, existiam mais espaços vazios entre as partículas de madeira do que entre as partículas de lignina, o que influi positivamente na densidade a granel.

O poder calorífico superior da lignina kraft foi diferente ao das partículas de madeira, devido a sua estrutura molecular, tendo maior proporção de carbono na sua composição química. Os valores encontrados estão de acordo com os trabalhos realizados por Pereira et al. (2016) e Siqueira (2017).

Tabela 2 – Valores médios das propriedades das partículas de madeira e da lignina kraft.

Propriedades	50% eucalipto/50% pinus	Lignina Kraft
Umidade _{bs} (%)	8,81 a	5,15 b
Densidade a granel (kg·m ⁻³)	217,33 b	370,37 a
Poder calorífico superior (MJ·kg ⁻¹)	18,92 b	25,30 a
Cinzas (%)	0,62 b	1,13 a
Materiais voláteis (%)	83,85 a	64,19 b
Carbono fixo (%)	15,53 b	34,67 a
Lignina total (%)	28,06	ND
Extrativos (%)	13,50	ND
Holocelulose* (%)	58,45	ND

ND: Não determinado. *Determinado por diferença. Médias na linha, seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste F.

Quanto a presença de minerais, observa-se que a lignina kraft apresenta maior teor de cinzas que a madeira, e isso se deve a presença de compostos inorgânicos residuais do processo de sua extração do licor negro. No entanto, o valor de cinzas encontrado para a lignina kraft é baixo quando comparado com outras ligninas encontradas no mercado, como a utilizada por Pereira et al. (2016), que possuía 16,32% de cinzas.

O teor de cinzas é tão importante que pode ser motivo de exclusão da matéria-prima para peletização, caso seja elevado. Menores teores são desejados, pois as cinzas não participam da combustão, tem correlação negativa com o poder calorífico, além de promover a corrosão nos equipamentos utilizados.

Os resultados encontrados para poder calorífico superior e teor de cinzas corroboram com os dados encontrados na literatura, como os de Berghel et al. (2013) ao utilizarem lignina kraft com teor de cinzas entre 0,2 e 1,4% como aditivo em *pellets* encontraram PCS da lignina variando de 25 a 27 MJ·kg⁻¹.

O teor de materiais voláteis na biomassa foi maior que o encontrado para a lignina, uma vez que a madeira é mais instável termicamente em relação à lignina.

O teor de carbono fixo da lignina kraft foi estatisticamente diferente em relação a mistura de biomassa. Isso é devido a sua composição estrutural, uma vez que a molécula de lignina é aromática, formada por grupos de fenilpropano com maior quantidade de ligações C-C e C-O-C, o que lhe confere maior estabilidade térmica. Assim, no processo de combustão a sua queima ocorre em período de tempo maior no estado sólido (BRAND, 2010).

Os valores médios da composição química estrutural (Tabela 1), obtidos neste estudo para a mistura de eucalipto e pinus corroboram com os observados na literatura, como os verificados por Pereira et al. (2016), que encontraram, respectivamente, 30,80%; 8,31% e 60,89% para teor de lignina, de extrativos e holoceluloses em madeira de eucalipto, e Siqueira (2017), ao trabalhar com madeira de pinus para a peletização, observou valores de 30,51%; 11,67% e 57,64% para teor de lignina, de extrativos e holoceluloses, respectivamente.

Castellano et al. (2015) concluíram que a composição da matéria-prima é o parâmetro mais importante, afetando a qualidade e propriedades dos *pellets*. *Pellets* produzidos a partir material com maiores teores de extrativos e lignina exibiram propriedades físicas melhoradas.

Madeiras de coníferas, com maior conteúdo de extrativos, são geralmente mais fáceis de serem compactadas em comparação às madeiras de folhosas (FILBAKK et al., 2011).

O teor de lignina é possivelmente o parâmetro mais importante para peletização, seguido pela umidade, pois esses dois fatores interagem diretamente para afetar a temperatura na qual a lignina amolece (WHITTAKER e SHIELD, 2017).

3.2 Caracterização dos *pellets*

Observou-se que a umidade dos *pellets* (Figura 1) foi menor em relação ao material preparado e condicionado antes da peletização. Uma vez que, a umidade base seca dos tratamentos ao entrar no sistema de alimentação da peletizadora era de $23 \pm 1\%$. Isso ocorre porque parte da água contida no material é liberada na forma de vapor d'água, devido à temperatura alcançada durante a peletização, aproximadamente 100°C , resultante do atrito entre o material a ser peletizado, os rolos e a matriz.

Houve efeito da adição de lignina nos valores de umidade, base seca, dos *pellets*. No entanto, observa-se que os *pellets* sem aditivo apresentaram menor umidade, quando comparados aos *pellets* com aditivo. Tal aumento da umidade com o aumento do teor de lignina indica, provavelmente, que a concentração de lignina na mistura de eucalipto e pinus tenha efeito lubrificante, reduzindo o atrito entre as paredes do canal de prensagem da matriz peletizadora e a biomassa, o que conseqüentemente reduz a temperatura de peletização e/ou tempo de retenção dos *pellets* na matriz, conferindo-lhes maior umidade em função do aumento da concentração de lignina.

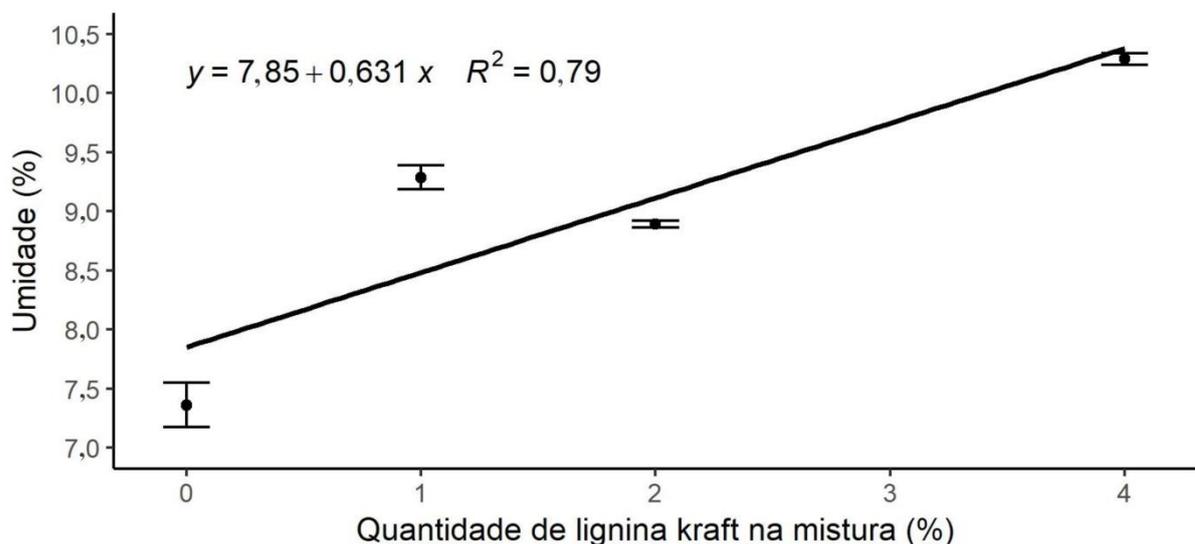


Figura 1 – Relação funcional entre a umidade, base seca (%), dos *pellets* e a porcentagem de lignina kraft adicionada.

Nielsen et al. (2009) mostraram que o aumento da umidade de pinus e faia durante a densificação resulta em diminuição da necessidade de energia para diferentes componentes do processo de peletização. Pirraglia et al. (2010) indicaram que na produção de *pellets* de

madeira em escala comercial a secagem requer cerca de 70% de energia. O que indica que o aumento da umidade inicial da matéria-prima pode acarretar ganhos de economia no processo. Além disso, material lignocelulósico excessivamente seco atua como isolante térmico que impede a transmissão de calor, elemento-chave no processo de compactação (MANI et al., 2006).

Cabe ressaltar que, somente os *pellets* com adição de 4% de lignina apresentaram valor de umidade superior ao permitido pela norma ISO 17225-2 (2013), que estabelece limite máximo de 10% de umidade base seca.

Sabe-se que o impacto da umidade é diferente dependendo do tipo de biomassa a ser densificada (TUMULURU et al., 2011). Monedero et al. (2015), relataram aumento na durabilidade e densidade aparente de *pellets* de Álamo, quando maior umidade foi testada (19% base seca).

De acordo com os resultados de comprimento e o diâmetro dos *pellets* não houve efeito significativo da adição de lignina, apresentando valores médios de 17,99 e 5,95 mm, respectivamente. Isso pode ser justificado pelo fato das dimensões dos *pellets* serem pré-determinadas. O diâmetro dos *pellets* é determinado pelo diâmetro dos canais de compressão da matriz peletizadora e o comprimento, por facas localizadas abaixo da matriz, de modo que o comprimento dos *pellets* é determinado pela altura das facas.

A densidade a granel dos *pellets* comportou-se de forma quadrática. Observa-se aumento da densidade a granel dos *pellets* até a adição de aproximadamente 2% de lignina kraft (Figura 2). Considerando os valores observados para densidade a granel da lignina (Tabela 1), esperava-se que o uso da lignina resultaria no aumento da densidade a granel dos *pellets* devido a sua granulometria e massa molecular. Contudo, tal comportamento não foi observado para o tratamento com adição de 4% de lignina kraft, apresentando valores inferiores aos *pellets* produzidos com apenas 2%.

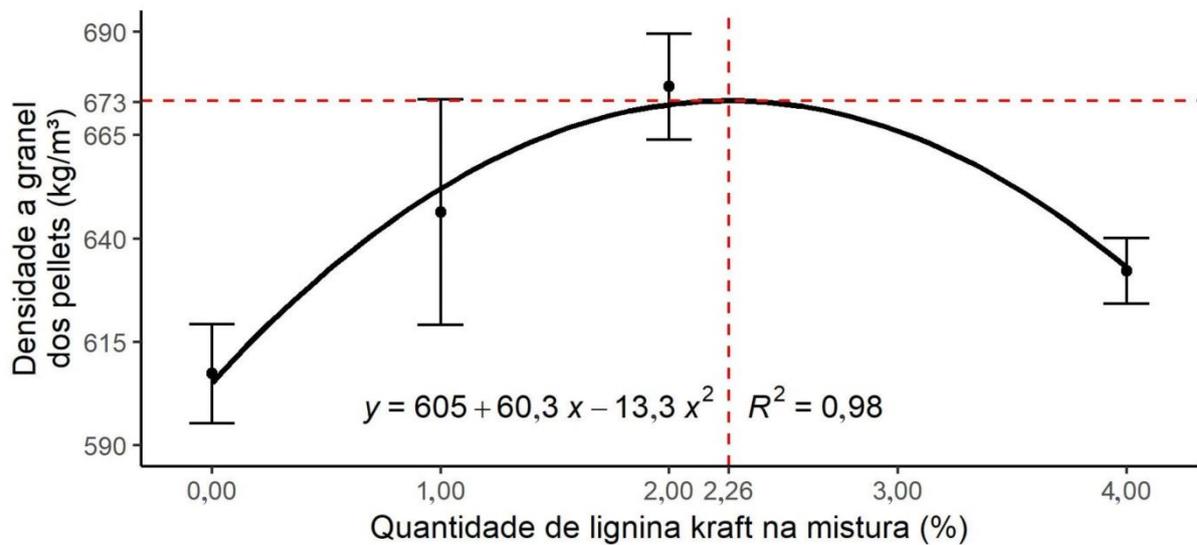


Figura 2 – Relação funcional entre a densidade a granel dos *pellets* e a porcentagem de lignina kraft adicionada.

A quantidade de lignina kraft responsável pelo maior valor de densidade a granel dos *pellets* (ponto de máximo) é 2,26%. Tal adição confere aos *pellets* densidade a granel de 673 kg.m⁻³.

Samuelsson et al. (2012) observaram que a densidade do *pellet* e o consumo de energia são determinados principalmente pela umidade. Segundo Mani et al. (2006; 2011) densidades granel e unitárias de biomassa peletizada dependem da umidade do material, tamanho da partícula, temperatura e pressão do processo.

A densidade unitária, como o nome já diz, indica a quantidade de massa unitária do *pellet* por volume. De acordo com a análise de regressão (Figura 3), houve efeito significativo das quantidades de lignina kraft adicionada para a produção dos *pellets* quanto a densidade unitária, que se comportou de forma quadrática.

A diferença entre a densidade unitária e a densidade a granel está no fato de que na densidade unitária não existem espaços vazios entre os *pellets* dentro do recipiente, resultando em valores maiores.

Os *pellets* com adição de 1% de lignina kraft apresentaram maior valor médio de densidade unitária, de 1185,4 kg.m⁻³.

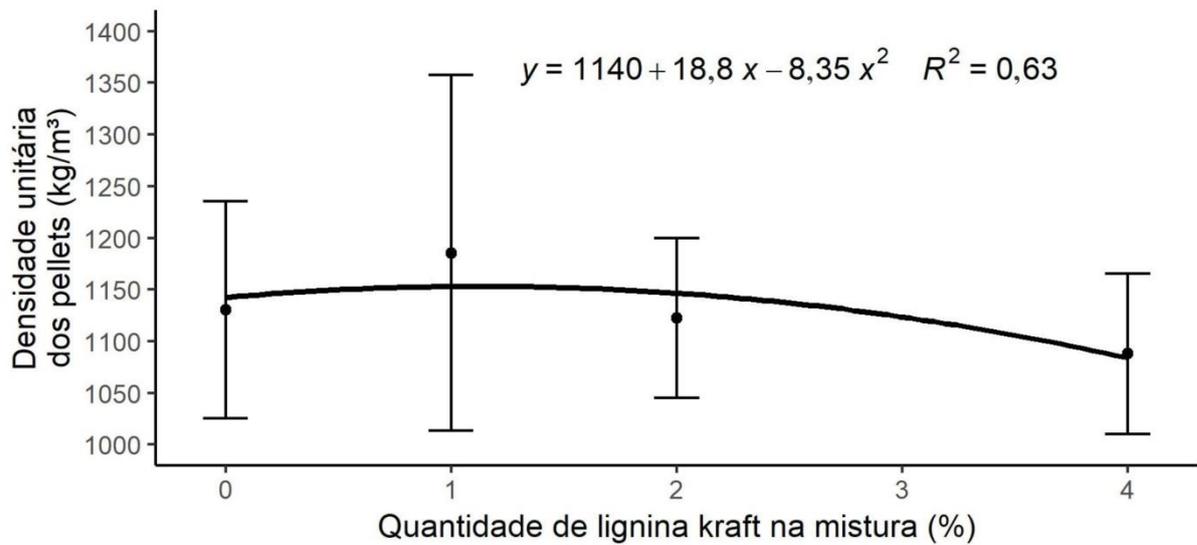


Figura 3 – Relação funcional entre a densidade unitária dos *pellets* e a porcentagem de lignina kraft adicionada.

Os parâmetros químicos dependem basicamente da matéria-prima e não devem mudar significativamente quando a esta é processada para obter o *pellet* (MONEDERO et al., 2015).

A composição química imediata dos combustíveis afeta diretamente o processo de combustão e a regulação dos equipamentos de queima. Em relação à composição química imediata dos *pellets*, não houve efeito significativo dos tratamentos nos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, os quais apresentaram valores médios de 83,26%; 0,58% e 16,33%, respectivamente. O ocorrido pode ser justificado pelo fato da matéria-prima utilizada em todos os tratamentos ser a mesma e porque as diferentes porcentagens de lignina estudadas não serem suficientes para afetar significativamente estas propriedades.

Os teores de cinzas observados neste estudo atendem ao especificado na norma ISO 17225-2 (2013), que estabelece valores máximos de 0,7%. Segundo Demirbas (2002), maiores teores de lignina contribuem com aumento do poder calorífico superior do combustível porque o PCS da lignina é maior que dos outros componentes primários da madeira. No entanto, o poder calorífico superior dos *pellets* não foi alterado estatisticamente pela adição de lignina kraft, apresentando valor médio de 19,15 MJ.kg⁻¹. Fato similar foi observado por Pereira et al. (2016), que ao trabalhar com *pellets* de eucalipto, excluindo-se a testemunha (0% de lignina), com adição de 1, 2, 3, 4 e 5% de lignina kraft, não verificaram diferença significativa entre os tratamentos quanto ao PCS.

Uma das vantagens dos *pellets* em relação aos demais combustíveis está relacionada à maior densidade energética, que se traduz em maior quantidade de energia por volume conhecido, facilitando o transporte e reduzindo custos.

A densidade energética a granel dos *pellets* (Figura 4) depende do PCS e da sua densidade. Esta propriedade comportou-se de forma quadrática. Verifica-se que houve aumento significativo da densidade energética a granel dos *pellets* até a adição de 2% de lignina kraft.

O máximo incremento de densidade energética média (ponto de máximo da curva), ocorreu com a adição de 2,42% de lignina kraft, resultando em densidade energética a granel de 12,93 $\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$. O que indica aumento energético de 1,44 $\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$, quando comparado os *pellets* sem adição de lignina.

Nota-se que ao adicionar 4% de lignina, a densidade energética a granel dos *pellets* sofre decréscimo médio de 0,63 $\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$ em relação a adição de 2% de lignina.

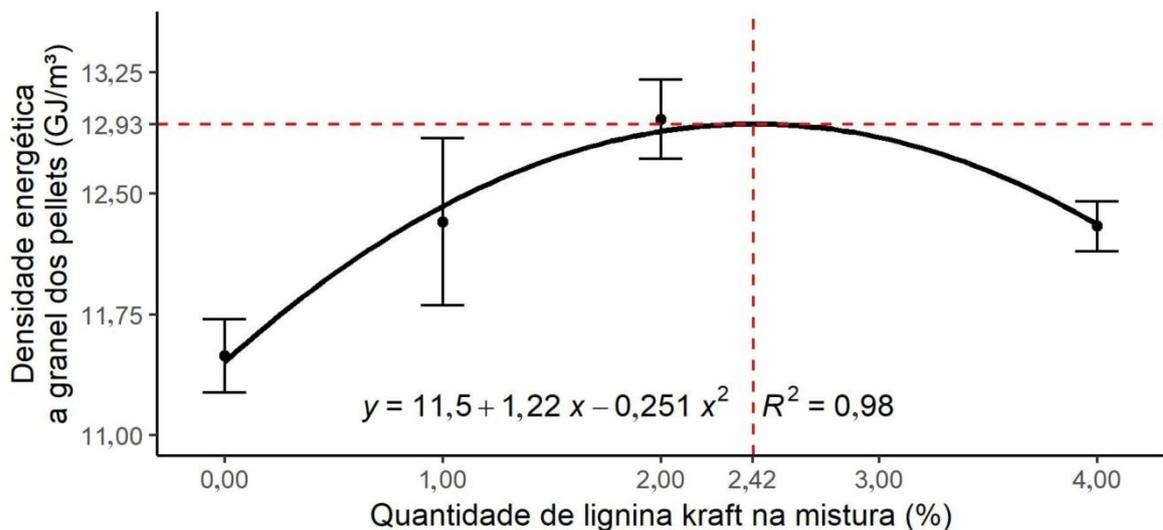


Figura 4 – Relação funcional entre a densidade energética a granel dos *pellets* e a percentagem de lignina kraft adicionada.

Como esperado, assim como para a densidade unitária, houve efeito significativo da adição de lignina na densidade energética unitária (Figura 5). O maior valor médio (22,60 $\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$) se deu ao adicionar 1% de lignina kraft à mistura de biomassas.

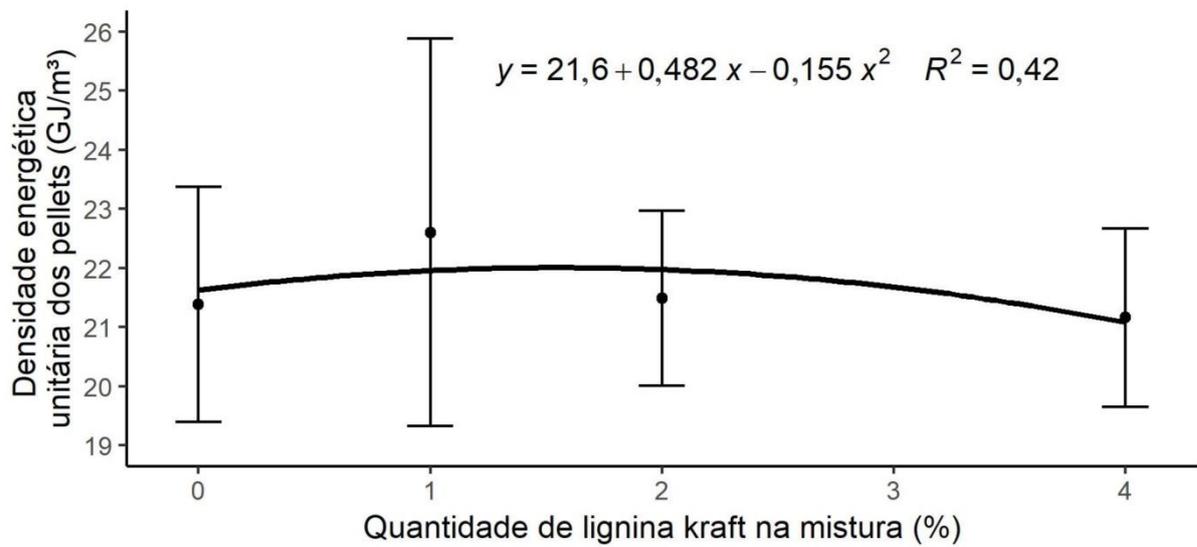


Figura 5 – Relação funcional entre a densidade energética unitária dos *pellets* e a porcentagem de lignina kraft adicionada.

O teor de finos representa a quantidade de perda de partículas, em massa, em relação à massa final dos *pellets*. Menores porcentagens de finos são desejadas, pois grandes quantidades de finos podem causar problemas durante a estocagem e processo de combustão, além de perigos relacionados com a saúde de operários e riscos de explosão (FILBAKK et al., 2011). Os resultados obtidos para o teor de finos não apresentaram efeito significativo da adição lignina, apresentando valor médio para os tratamentos de 0,08%. No entanto, vale ressaltar que todos os tratamentos apresentaram valores de finos abaixo do máximo permitido pela norma ISO 17225-2 (2013) que estipula valores inferiores a 1%.

A durabilidade mecânica pode ser definida como a capacidade dos *pellets* de suportar o abrasivo, impacto, e as resistências de atrito durante o manuseio, armazenamento e transporte (TUMULURU, 2016). De acordo com os resultados da regressão (Figura 6), observou-se efeito significativo da adição de lignina kraft. Observa-se que a adição de 1% de lignina foi suficiente para aumentar o valor médio de durabilidade mecânica dos *pellets* em 5,51%. Enquanto a adição de 4% de lignina promoveu aumento dessa propriedade em 6,04%. No entanto o valor máximo de durabilidade mecânica, 98,22%, é alcançado ao se adicionar 2,92% de lignina.

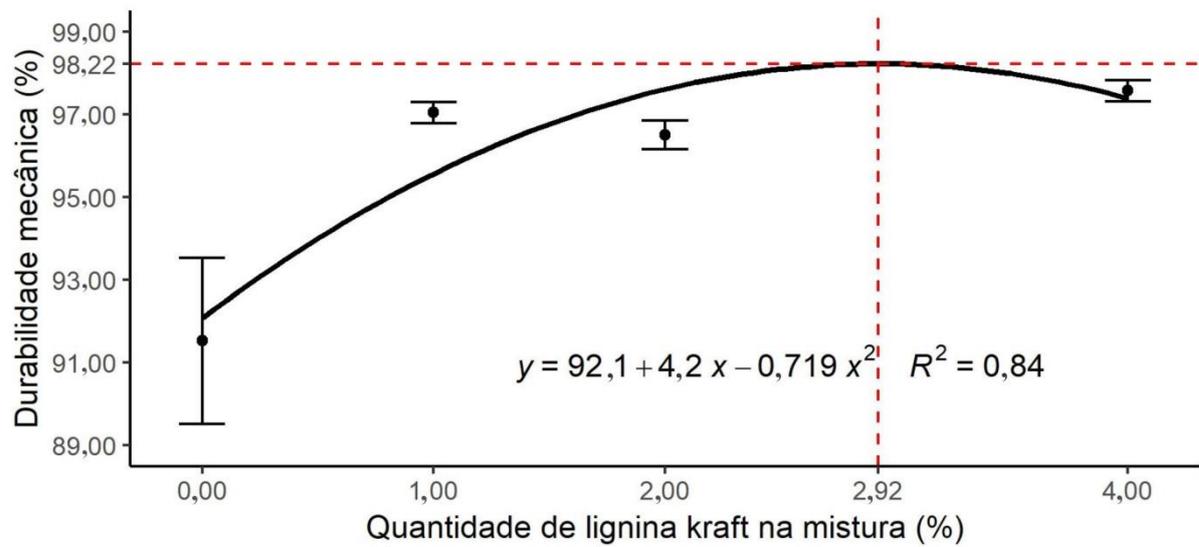


Figura 6 – Relação funcional entre a durabilidade dos *pellets* e a porcentagem de lignina kraft adicionada.

A lignina kraft de fato melhora as propriedades dos *pellets*, de forma a aumentar a resistência mecânica, como em estudos realizados por Berghel et. al. (2013), Pereira et al. (2016) e Whittaker e Shield (2017), os quais observaram melhorias nas propriedades mecânicas dos *pellets*. Kuokkanen et al. (2011), verificaram que a adição de 2% de lignina kraft e lignosulfato, ambos subprodutos da indústria de papel, aumentou a durabilidade do *pellet* de pinheiro escocês em 0,8%, enquanto Berghel et. al. (2013) verificaram aumento de 1,4% em pinheiro da Noruega.

Em relação à dureza (Figura 7), observa-se aumento dessa característica com o acréscimo da porcentagem de lignina kraft. Indicando que, quanto maior a adição de lignina kraft, maior a adesão entre as partículas e, portanto, maior a dureza dos *pellets* produzidos. Comparando-se o valor médio de dureza encontrado para *pellets* sem aditivo (31,06 kg) com o valor dos *pellets* produzidos com adição de 4% de lignina kraft (41,04 kg), houve aumento de 9,98 kg na dureza, o que representa 32,13% do valor obtido para *pellets* sem aditivo.

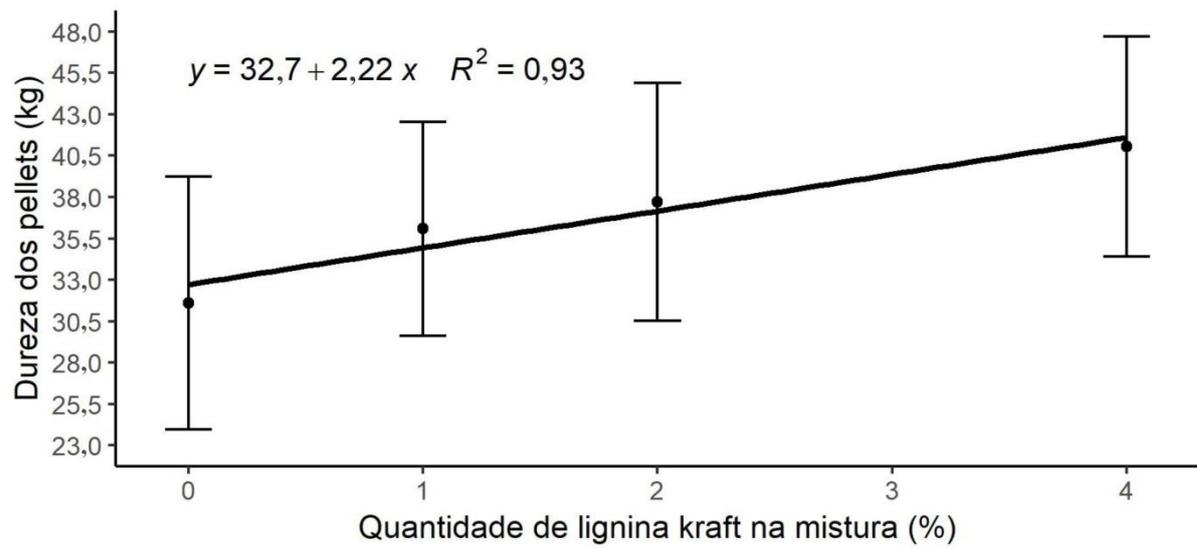


Figura 7 – Relação funcional entre a dureza dos *pellets* e a porcentagem de lignina kraft adicionada.

4 CONCLUSÕES

A lignina kraft utilizada neste estudo, apresentou características favoráveis ao processo de peletização, como baixos teores de umidade e cinzas.

No entanto, do ponto de vista energético, as quantidades de lignina avaliadas não foram o bastante para aumentar significativamente os valores de poder calorífico superior.

A utilização da lignina contribuiu significativamente, principalmente para as propriedades mecânicas, o que promoverá melhorias para o transporte, armazenamento e manuseio por longas distâncias, reduzindo custos e mantendo a integridade do biocombustível.

Com o objetivo de melhorias nas propriedades mecânicas dos *pellets*, a adição de 4% de lignina kraft apresentou os melhores resultados. Já para propriedades físicas, adições até 2% apresentam melhorias.

Considerando que a normativa de comercialização utilizada para qualificar *pellets* de madeira ISO 17225-2 (2013) permite o uso de aditivos apenas até 2% em relação à massa seca da matéria-prima, esta quantidade é a mais indicada ao se propor melhorias na qualidade de *pellets* de misturas de madeira, nessas condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D1762-84: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International. 2 p. 2007.

_____. ASTM E711-87: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia: ASTM International. 8 p. 2004.

BASSO, D.; PATUZZI, F.; CASTELLO, D.; BARATIERI, M.; RADA, E.C.; WEISS-HORTALA, E. Agro-industrial waste to solid biofuel through hydrothermal carbonization. **Waste Manag**, 47, pp. 114-121, 2016.

BERGHEL, J.; FRODESON, S.; GRANSTROM, K.; RENSTROM, R.; STAHL, M.; NORDGREN, D.; TOMANI, P. The effects of kraft lignin additives on wood fuel pellet quality, energy use and shelf life. **Fuel Processing Technology**, v. 112, p. 64 - 69, 2013.

BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, p. 131, 2010.

CASTELLANO, J. M.; GÓMEZ, M.; FERNÁNDEZ, M.; ESTEBAN, L. S.; CARRASCO, J. E.. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. **Fuel**. Volume 139, p. 629-636, 2015.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 2, p. 183-188, 2001.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy, Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14774-1**: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method. Berlin: CEN, p. 10, 2010.

_____. **DIN EN 15210-1**: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets. Berlin: CEN, p. 12, 2010.

_____. **DIN EN 16127**: Determination of length and diameter of pellets. Berlin: CEN, p. 11, 2012.

FERREIRA, J. C.; FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.. **Potencialidade do uso de resíduos vegetais para a geração de energia através da técnica de briquetagem**. Biomassa BioEnergia, 2, pp. 623-638, 2012.

FILBAKK, T.; SKJEVRAK, G.; HØIBØ, O.; DIBDIAKOVA, J.; JIRJIS, R. The influence of storage and drying methods for Scots pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters. **Fuel Process Technol**, 92 (5), pp. 871-878, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17225-2: 2013 - Solid biofuels - Fuels specification and classes - Part 2 - Graded pellets. Brussels, 2013.

KUOKKANEN, M. J.; VILPPO, T.; KUOKKANEN, T.; STOOR, T.; NIINIMÄKI, J. Additives in wood pellet production—a pilot-scale study of binding agent usage. *Bioresources*, v. 6, n. 4, p. 4331-4355, 2011.

- LUNA, H.; HERNÁNDEZ-VÁZQUEZA, L.; REYO, A.; ARIAS, L.; MANJARREZ, N.; NAVARRO-OCAÑA, A. Banana and maize leaf wastes as a green alternative for the preparation of benzyl alcohols used as starting materials for fragrances. **Ind Crops Prod**, 59, pp. 105-108, 2014.
- MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, v. 30, n. 7, p. 648-654, 2006.
- MONEDERO, E.; PORTERO, H.; LAPUERTA, M. Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. **Fuel Processing Technology** 132, 15–23, 2015.
- NEVES, P. V.; PITARELO, A. P.; RAMOS, L. P. **Production of cellulosic ethanol from sugarcane bagasse by steam explosion: effect of extractives content, acid catalysis and different fermentation Technologies**. *Bioresour Technol*, 208, pp. 184-194, 2016.
- NIELSEN, N. P. K.; GARDNER, D. J.; POULSEN, T.; FELBY, C. Importance of Temperature, Moisture Content, and Species for the Conversion Process of Wood Residues into Fuel *Pellets*. **Wood and Fiber Science**, v. 41, n. 4, p. 414-425, 2009.
- NIELSEN, N.P..K.; GARDNER, D.J.; FELBY, C. Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. **Fuel** 89:94–98, 2010.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; CANAL, W. D. Influência da adição de lignina kraft nas propriedades de pellets de eucalipto. **FLORESTA**, v. 46, n. 2, p. 235 - 242, 2016.
- PIRRAGLIA, A., GONZALEZ, R., & SALONI, D. Techno-economical analysis of wood pellets production for US Manufacturers. *BioResources*, v.5, n°4, p.2374-2390, 2010.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2018.
- REN21 (2012) Renewables Global Status Report. Paris, France, Renewable Policy Network for the 21st Century. Disponível em: <http://www.ren21.net/default.aspx?tabid=5434>. Acesso em: 23 ago 2018.
- SAMUELSON, R.; LARSSON, S. H.; THYREL, M.; LESTANDER, T. A. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. **Applied Energy**, 99, pp. 109-115, 2012.
- SIGNURIŠIĆ-MLADENOVIĆ, N.; ŠKRBIĆ, B. D.; ZABANIOTOU, A. Chemometric interpretation of different biomass gasification processes based on the syngas quality: assessment of crude glycerol co-gasification with lignocellulosic biomass. **Renew Sustain Energy. Rev**, 59, pp. 649-661, 2016.
- SIQUEIRA, H. F. Efeito de aditivos na qualidade de *pellets* de madeira para uso energético. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- SPANHOL, A.; NONES, D. L.; KUMABE, F. J. B.; BRAND, M. A. Qualidade dos *pellets* de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 833, 2015.
- STÄHL, M.; BERGHEL, J.; GRANSTRÖM, K. Improvement of Wood Fuel Pellet Quality Using Sustainable Sugar Additives. **BioResources** 11(2), 3373-3383, 2016.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, T. A. A. P. I. **TAPPI. T 222 om-02**. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2002, 5 p.

_____. **T 204 cm-97**: Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI, 1997. 4 p.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

TUMULURU, J. S.. Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resources Conversion*. v.1, p. 44-54, 2016.

VASSILEV, S.V.; VASSILEVA, C.G.; VASSILEV, V.S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview. **Fuel**, 158, pp. 330-350, 2015.

WHITTAKER, C.; SHIELD, I. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 71, p. 1-11, 2017.

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

ZABANIOTOU, A.; BITOU, P.; KANELIS, T.; MANARA, P.; STAVROPOULOS, G.; CYNARA, C. Investigating biomass gasification producer gas suitability for CHP, second generation biofuels, and H₂ production. **Ind Crops Prod**, 61, pp. 308-316, 2014.

ZHU, W. Equilibrium of lignina precipitation – The effects of pH, temperature, ion strenght and wood origins. Thesis (Degree of Licenciate of Engineering in Forest Products and Chemical Engineering) – Chalmers University of Technology. 68p. 2013.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Resumo das análises de variância para umidade (base seca), densidade a granel, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo das matérias-primas.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio				
		Umidade b.s.*	Densidade a granel*	Materiais voláteis*	Cinzas*	Carbono fixo*
Proporção da mistura	1	20,0303	35131,00	579,45	0,39096	549,73
Resíduo	4	0,0235	97,00	0,96	0,00398	0,91
Média geral		7,00	293,90	74,0194	0,5970	25,1038
Coeficiente de variação (%)		2,2%	3,36%	1,33 %	7,19 %	3,8%

*Significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE B – Resumo das análises de variância para poder calorífico superior das matérias-primas.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
		Poder Calorífico*
Proporção da mistura	1	40,686
Resíduo	2	0,032
Média geral		20,38
Coeficiente de variação (%)		0,81 %

*Significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE C – Resumo das análises de variância para umidade (base seca), cinzas, materiais voláteis e carbono fixo dos *pellets*.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio			
		Umidade (b.s.)*	Cinzas**	Materiais voláteis**	Carbono Fixo**
Proporção da mistura	3	4,4289	0,024327	1,38835	1,62301
Resíduo	8	0,0123	0,010677	0,74377	0,75731
Média geral		8,75	0,58	83,26	16,16
Coeficiente de variação (%)		1,24%	17,74%	1,04%	5,39 %

*Significativo a 95% de probabilidade; **Não significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE D – Resumo das análises de variância para poder calorífico superior dos *pellets* produzidos.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
		Poder Calorífico**
Proporção da mistura	3	0,099102
Resíduo	4	0,023161
Média geral		19,15
Coeficiente de variação (%)		0,79 %

**Não significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE E – Resumo das análises de variância para diâmetro, comprimento, densidade unitária e energética unitária dos *pellets*.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio			
		Diâmetro**	Comprimento**	Densidade unitária*	Densidade energética unitária*
Proporção da mistura	3	0,0072967	5,1027	163037	41,319
Resíduo	396	0,0054900	2,5452	13152	4,793
Média geral		6,06	18,15	1168,38	22,41
Coeficiente de variação (%)		1,23 %	8,54 %	10,14%	10,11 %

*Significativo a 95% de probabilidade; **Não significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE F – Resumo das análises de variância para finos e durabilidade mecânica dos *pellets*.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	
		Finos**	Durabilidade*
Proporção da mistura	3	0,0027624	23,3441
Resíduo	8	0,0016939	1,0636
Média geral		0,07	94,72
Coeficiente de variação (%)		52,79 %	1,08 %

*Significativo a 95% de probabilidade; **Não significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE G – Resumo das análises de variância para densidade a granel e densidade energética a granel dos *pellets* produzidos.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	
		Densidade a granel*	Densidade energética a granel*
Proporção da mistura	3	5024,70	2,16650
Resíduo	20	278,10	0,10126
Média geral		623,57	11,97
Coeficiente de variação (%)		2,60 %	2,59%

*Significativo a 95% de probabilidade.

APÊNDICE H – Resumo das análises de variância para a dureza dos *pellets*.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
		Dureza*
Proporção da mistura	3	385,32
Resíduo	96	48,91
Média geral		36,00
Coeficiente de variação (%)		19,10 %

*Significativo a 95% de probabilidade.