

HUMBERTO FAULLER DE SIQUEIRA

**EFEITO DE ADITIVOS NA QUALIDADE DE *PELLETS* DE MADEIRA
PARA USO ENERGÉTICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

S618e
2017 Siqueira, Humberto Fauller de, 1992-
Efeito de aditivos na qualidade de *pellets* de madeira para
uso energético / Humberto Fauller de Siqueira. – Viçosa, MG,
2017.
v, 43 f. : il. ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 37-41.

1. Péletes de madeira - Aditivos. 2. Lignina. 3. Amido.
4. Energia - Fontes alternativas. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

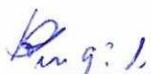
CDO adapt. CDD 634.989

HUMBERTO FAULLER DE SIQUEIRA

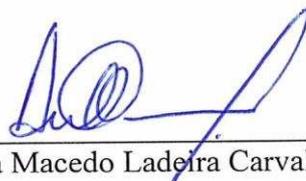
**EFEITOS DE ADITIVOS NA QUALIDADE DE *PELLETS* DE MADEIRA PARA
USO ENERGÉTICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2017.



Paulo Fernando Trugilho



Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho



Vinícius Resende de Castro



Benedito Rocha Vital
(Coorientador)



Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e por não me deixar desistir diante das dificuldades durante esta caminhada. Agradeço também à minha família por sempre acreditar e me incentivar a alcançar meus objetivos. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nesta caminhada. Aos meus amigos nazariense, que mesmo estando distante não deixamos de nos relacionar, que todo este tempo serviu para demonstrar o quão próximo estamos e que amigos de verdade são para vida toda. Aos meus amigos de república por nos mantermos unidos e sempre procurando ajudarmos uns aos outros nesta longa e difícil caminhada. Aos professores Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Benedito Rocha Vital, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho e Marcos Oliveira de Paula pelos ensinamentos, oportunidades e pela confiança durante todos esses anos, nossas conversas durante e para além do laboratório foram fundamentais para meu desenvolvimento profissional e pessoal. A Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela oportunidade de cursar o mestrado e por tudo que foi proporcionado. Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado. Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, em especial, o secretário Francisco Ricardo Bezerra e Eder Cabral de Sousa pela disponibilidade a ajuda durante a realização de todo o experimento. Aos doutorandos Mateus Alves Magalhães e Carlos Miguel Simões da Silva pelos ensinamentos, ajuda e acessibilidade durante a realização do experimento. A todos meus amigos do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, em especial, Welliton, Felipe, Reginaldo, Fernanda Ferreira e Laura, pela disponibilidade e ajuda nas coletas e realização do experimento e ao Wagner e Erlon pelo acolhimento durante minha chegada a Viçosa – MG. Agradeço também ao Departamento de Zootecnia da UFV, pelo fornecimento e preparação da madeira. Por fim, agradeço a todos que de forma direta e indireta contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Matriz energética brasileira	4
3.1.2 Mercado de <i>pellets</i>	5
3.2. Peletização	6
3.2.1. Matéria-prima	6
3.2.2. Processo de peletização	11
3.2.3. Qualidade dos <i>pellets</i>	12
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1. Material experimental	15
4.1.1. Fonte de biomassa	15
4.1.2. Fontes de aditivos.....	15
4.2. Caracterização do material experimental	15
4.3. Produção dos <i>pellets</i>	17
4.4. Caracterização dos <i>pellets</i>	18
4.4.1. Classificação dos <i>pellets</i>	19
4.5. Delineamento experimental.....	19
4.5.1. Propriedade das matérias primas.....	19
4.5.2. Propriedades dos <i>pellets</i>	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5.1. Propriedades das matérias primas	21
5.2. Propriedades dos <i>pellets</i>	24
5.2.1. Propriedades dimensionais dos <i>pellets</i>	24
5.2.2. Propriedades físicas dos <i>pellets</i>	27
5.2.3. Propriedades químicas dos <i>pellets</i>	29
5.2.4. Propriedades mecânicas dos <i>pellets</i>	32
6. CONCLUSÃO	36
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
8. ANEXO	42

RESUMO

SIQUEIRA, Humberto Fauller de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Efeitos de aditivos na qualidade de *pellets* para uso energético**. Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientador: Benedito Rocha Vital.

A participação da biomassa florestal na produção bioenergética fornece uma grande diversidade de biocombustíveis com potencial energético similar aos combustíveis fósseis, por exemplo, os briquetes e *pellets*. Os *pellets* por ser um produto renovável, oriundo do beneficiamento da madeira e de grande interesse do mercado externo, têm como benefício garantir a qualidade deste produto até o consumidor final, mantendo sua integridade física, química e mecânica, o qual pode ser obtido através do uso de aditivos para tal finalidade. Diante disto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de lignina *kraft* e amido, em diferentes proporções, na qualidade dos *pellets* de madeira para fins energéticos. Foi utilizado madeira de *Pinus taeda*, sem casca e processada em moinho martelo. Foram utilizados dois tipos de amido (trigo e milho) e lignina *kraft* e adicionados a 1, 2, 3, 4 e 5% em relação à massa seca de partículas para a produção dos *pellets*. Para madeira e aditivos foi determinada a densidade a granel, teor de umidade, poder calorífico superior e útil, análise química imediata e elementar, e somente para madeira, densidade básica e análise química molecular. Foram produzidos *pellets* com partículas a 12% de umidade, base seca, e classificada em peneira de 3 e 1mm, através de uma prensa peletizadora laboratorial. Para caracterização dos *pellets*, foi determinada a densidade a granel, densidade relativa aparente, teor de umidade, poder calorífico superior e útil, análise química imediata, durabilidade mecânica, finos, dureza, diâmetro e comprimento. Os *pellets* foram classificados conforme normativa europeia EN 14961-2. Conclui-se que a madeira de *Pinus taeda* apresenta propriedades favoráveis para produção de *pellets*. Os aditivos apresentam potencial para utilização em processos de peletização, necessitando de adaptações ao processo utilizado. Os *pellets* produzidos com aditivos a base de amido de trigo apresentam características inferiores aos produzidos com lignina. Os *pellets* produzidos com amido de milho e lignina adequam-se ao exigido pela normativa de comercialização mesmo em proporções inferior a 2%. Para algumas propriedades os *pellets* aditivados apresentaram resultados inferiores à testemunha, contudo estes tratamentos apresentaram propriedades mecânicas superiores.

ABSTRACT

SIQUEIRA, Humberto Fauller de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2017. **Effect of the addition of kraft lignin and starch as wood pellets for energy production.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-Advisor: Benedito Rocha Vital.

The participation of forest biomass in bioenergy production provides a great diversity of biofuels with energy potential some to fossil fuels, for example, briquetes and pellets. Pellets as to be a renewable product, derived from the wood processing and of great interest of the international market, have as benefit of ensure the quality of this product to until final consumer, maintaining its physical, chemical and mechanical integrity, which can be obtained through use of additives for such finality. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effect of the addition of kraft lignin and starch, in different proportions, on the quality of the wood pellets for energy purposes. Was used wood of *Pinus taeda*. without bark and processed in hammer mill. Were added two types of starch (wheat and corn) and kraft lignin and added at 1, 2, 3, 4 and 5% in relation to the dry mass of the particles for pellet production. For wood and additives, was determined bulk density, moisture content, high and net heating value, immediate and elemental chemical analysis, and only for wood, basic density and molecular chemical analysis. Were produced pellets with particles at 12% moisture, dry basis, and classified in 3 and 1mm sieves, through a laboratory pelletizing press. In order to characterize the pellets, were determined bulk density, apparent relative density, moisture content, high and net heating value, immediate chemical analysis, mechanical durability, fines, hardness, diameter and length. Pellets were classified according to European standard EN 14961-2. It is concluded that the wood of *Pinus taeda*. Presents favorable properties for pellet production. The additives present potential for utilization in pelletizing processes, necessitating adaptations to the process used. Pellets produced with additives based on wheat starch present lower characteristics than those produced with lignin. Pellets produced from maize starch and lignin meet the requirements of the standard commercialization even in proportions less than 2%. For some properties the pellets added had inferior results to the control, however these treatments presented superior mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

A participação da biomassa na matriz energética brasileira como fonte de matéria-prima para produção de energia vem aumentando nos últimos anos. Em 2015, aproximadamente 41,91% da produção da energia primária no país foi obtida de fontes renováveis e destes, 42% foram provenientes de produtos da cana-de-açúcar e 20,42% provenientes da madeira (EPE, 2016).

Perante a significativa participação da biomassa florestal para produção bioenergética, destacam-se os mais diversos usos da madeira para este fim, por exemplo, a lenha *in natura*, a transformação em carvão vegetal e o processamento da madeira para produção de cavacos e/ou para produção de briquetes e *pellets*.

Em destaque à produção e consumo de *pellets*, há uma enorme participação na matriz energética de países do hemisfério norte, principalmente no continente europeu, onde grande parte da energia produzida é oriunda de usinas termelétricas alimentadas por *pellets* e também para o aquecimento doméstico, devido ao clima frio.

Os *pellets* são combustíveis sólidos, granulados e renováveis produzidos na forma de cilindros com diâmetro entre 6 e 8 mm, de elevada densidade energética, geralmente, produzidos a partir de partículas uniformes de biomassa, aquecidas e compactadas. A qualidade dos *pellets* varia devido à diversidade e heterogeneidade da matéria-prima utilizada para sua produção e ao processo de compactação. Esses fatores, de modo geral, são passíveis de controlar, principalmente, quando se utiliza biomassa proveniente de resíduos, o que pode ocasionar aumento de compostos inorgânicos indesejáveis, além de proporcionar uma baixa durabilidade mecânica dos *pellets*, que apresenta impacto direto no transporte, armazenamento e utilização, visto que os mesmos podem desintegrar-se e gerar finos durante o transporte e toda logística envolvida até a chegada para o consumidor final.

Cabe salientar, que os *pellets* são distribuídos a granel, transportados por caminhões caçambas ou tanque, ou empacotados em sacos de 15 kg ou “big-bags” de 1000 kg. Dessa forma, as exigências sobre as propriedades mecânicas destes produtos são altas, principalmente quando o mercado externo passa a ser o destino final.

No Brasil há um déficit em infraestrutura de transporte, predominando o sistema rodoviário como principal meio de transporte de cargas ligando os principais polos produtivos ao sistema portuário. Além de toda burocracia para exportação, a falta de espaços nos pátios de estocagem faz com que ocorra maior movimentação de cargas e consequente redução na qualidade dos *pellets*.

Além do transporte, o armazenamento dos *pellets* é outro fator que pode reduzir a sua qualidade, uma vez que a armazenagem pode ser feita em sacos plásticos ou de papel, para uso doméstico; ou em silos, no caso, para uso industrial. Dessa forma, todas as atividades envolvidas no processo até a chegada ao consumidor final podem afetar as propriedades mecânicas e em consequência disso, ocorrer à geração de finos e até desintegração dos *pellets*, podendo ocasionar perda de material e até mesmo aumentar o risco de incêndio.

Dessa forma, a adição de aglutinantes pode ser uma alternativa para potencializar a produção dos *pellets*, além de atingir e manter o padrão de qualidade exigido pelos principais centros consumidores destes biocombustíveis para fins energéticos, no caso o mercado internacional. Os aglutinantes ou aditivos são compostos que são adicionados com finalidade de facilitar o processo de densificação da madeira e gerar *pellets* com maior resistência mecânica, sem que haja interferências significativas nas demais propriedades energéticas.

Neste sentido, realizar estudos visando melhorar as propriedades mecânicas dos *pellets* através da adição de aglutinantes naturais como realizados por Wilson (2010); Berghel *et al.* (2013) e Lockneus (2014) torna-se uma alternativa. Uma vez que *pellets* com maior durabilidade e menor teor de finos permitem transportes a longas distâncias e maior tempo de armazenamento sem que haja a desintegração e interferência na qualidade do uso deste biomateriais.

Os aditivos comumente utilizados para produção de *pellets* são os lignosulfonados, amidos, dolomita e alguns óleos vegetais (TARASOV *et al.*, 2013). Para fins energéticos, os aditivos a base de amido são os mais utilizados, devido à disponibilidade no mercado e, em alguns casos, ser considerado resíduo na indústria de beneficiamento de grãos, obtendo o amido da varrição.

Outro resíduo que está sendo amplamente estudado e apresenta potencial energético é a lignina *kraft*, oriunda do processo de polpação da madeira. Uma vez que este resíduo é utilizado na queima direta para fins energéticos, associá-lo ao processo de peletização pode ser uma alternativa para agregar valor ao produto e, em consequência disso, melhorar as propriedades dos *pellets*.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito da adição de lignina *kraft* e amido de milho e trigo na qualidade de *pellets* de madeira para fins energéticos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física e química da madeira de *Pinus sp.* para produção dos *pellets*;
- Caracterizar três diferentes tipos de aditivos utilizados na produção dos *pellets*;
- Avaliar o efeito da adição dos aditivos em diferentes porcentagens nas propriedades físicas, químicas e mecânica dos *pellets*;
- Classificar os *pellets* conforme normativas europeias de comercialização.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Matriz energética brasileira

Grande parte da oferta interna de energia brasileira é oriunda de fontes não renováveis (58,8%) e, a significativa participação das fontes renováveis na produção primária de energia (41,2%), qualifica o Brasil como o país com maior utilização destas fontes na matriz energética (EPE, 2016). Segundo EPE (2016), em 2015, o Brasil foi o país com maior participação de fontes renováveis na matriz energética, com aumento em relação ao ano de 2014 (39,4%), devido à queda da oferta interna de petróleo e derivados. Dentre as fontes renováveis, cita-se o bagaço de cana-de-açúcar (16,9%), hidráulica (11,3%), lenha e carvão vegetal (8,2%) e lixo e outras renováveis (4,7%).

Na matriz elétrica brasileira, 64% da oferta correspondem à hidráulica, e 8,0% à biomassa, que incluem bagaço de cana, lenha e lixo. Isso corresponde a 75% de participação das renováveis na matriz elétrica, resultado da queda da geração térmica com derivados do petróleo e ao incremento das gerações de energia elétrica por usinas a biomassa e eólica (EPE, 2016).

Dentre as diversas fontes de biomassa para fins energéticos, têm-se as biomassas agrícolas (cana-de-açúcar e seus derivados, capim elefante, etc.) e a biomassa florestal (lenha e o carvão vegetal). Grande parte da biomassa florestal para fins energéticos é produzida a partir de plantios de curta rotação, com espécies de rápido crescimento, corte em idade precoce, entre 5-7 anos e que apresenta potencial produtivo no país, devido às extensas áreas agricultáveis.

Além da utilização da madeira para produção direta de energia, na forma de lenha e transformação em carvão vegetal, os diversos segmentos da cadeia produtiva florestal geram subprodutos que podem ser beneficiados e utilizados para fins energéticos. Segundo Schneider et al. (2012) na cadeia de florestas plantadas, estima-se a geração de, aproximadamente, 75% de resíduo em todo processo produtivo, contudo essa percentagem varia de acordo com o nível de beneficiamento da madeira e do produto final gerado.

Logo, na busca por melhor forma de aproveitamento dos recursos renováveis e menor dependência dos combustíveis fósseis, opta-se por fontes energéticas modernas, renováveis e com baixa poluição ambiental dentre as quais se destaca a densificação da biomassa florestal na forma de briquetes e *pellets*, obtidos a partir do processamento

industrial da madeira e/ou resíduos florestais que visam aumentar o conteúdo energético e homogeneização do produto final.

3.1.2 Mercado de *pellets*

O mercado de *pellets* encontra-se em franca expansão, principalmente no cenário internacional. Em 2006 a produção mundial estimada de *pellets* de madeira foi, aproximadamente, 7,6 milhões de toneladas. Em 2014, a produção mundial de *pellets* de madeira atingiu 25,5 milhões de toneladas e o consumo esteve próximo a 20 milhões de toneladas, representando aumento de mais de 175% se comparado a 2010 (HUANG, 2015).

Países como Canadá, Estados Unidos, Alemanha e Suécia destacam-se como os principais produtores de *pellets*, contudo, como consequência, o fornecimento instável e inseguro de matéria-prima pode ser um entrave para manter a sua produção.

Face a isto, o Brasil destaca-se no cenário internacional de *pellets* como país emergente, uma vez que há disponibilidade de matéria-prima florestal e resíduos agroflorestais para tal finalidade em decorrência da sua abundância, devido a aptidão para estabelecimento de culturas agrícolas e florestais.

Segundo Garcia (2014) no Brasil, em 2012, o consumo de *pellets* foi de aproximadamente 39.800 toneladas, sendo as indústrias, pizzarias, padarias, hotéis e parques aquáticos como os principais consumidores. Em 2010 o Brasil possuía 10 plantas industriais com capacidade produtiva relatada de 320 toneladas por ano, aproximadamente (IEA, 2011); atualmente o Brasil dispõe de 19 plantas industriais de *pellet's*, mas muitas estão produzindo abaixo da capacidade produtiva (ABIPEL, 2014), contudo, o setor está se estabelecendo em vista dos investimentos e acordos firmados pelas grandes indústrias de base florestal no país.

Em vista da crescente produção e consumo de *pellets*, o mercado europeu que é o principal consumidor, possui elevado rigor de comercialização, uma vez que, são utilizados em ambientes não industriais, principalmente para aquecimento doméstico e em caldeiras comerciais, em pequena escala.

Devido aos diversos usos dos *pellets*, o Comitê Europeu de Normatização (CEN) criou normativas de comercialização de combustíveis sólidos madeireiros e não madeireiros, que classifica e especifica os combustíveis, apresentando valores máximos e mínimos para comercialização, no entanto, usam-se, de modo geral, como referência

as normas DIN EN 14.961-2 (2011) para *pellets* de madeira e DIN EN 14.961-6 (2012) para *pellets* de não madeira.

Torna-se necessário o elevado rigor das normativas de comercialização, uma vez que a qualidade do combustível pode causar grandes problemas ambientais e industriais. Os equipamentos de queima de pequena escala, geralmente, não possuem controles avançados de limpeza dos gases da combustão; também não são manuseados por profissionais; e em muitos casos, são localizados dentro de residências e locais habitados (DIN EN 14.961-1, 2010).

3.2. Peletização

3.2.1. Matéria-prima

3.2.1.1. Madeira

O uso da biomassa florestal para fins energéticos, de modo geral, apresenta grande variação referente à sua composição química e física, as quais influenciam diretamente nas propriedades energéticas, no processo de combustão e na utilização dos coprodutos gerados a partir da transformação da madeira, por exemplo, a densificação.

A densidade e o teor de umidade da matéria-prima são as principais características que influenciam na peletização. A densidade influencia a densidade energética dos *pellets*. Além disso, materiais com maior densidade exigem equipamentos com maior potência e maior gasto energético. O teor de umidade influencia na formação dos *pellets* devido ao processo de transferência de calor com consequente plasticização da lignina, e também por reduzir as propriedades energéticas do combustível (TUMURULU et al., 2011).

Um dos principais constituintes químicos a ser avaliado na madeira para produção de *pellets* é o teor de lignina, pois a mesma libera maior quantidade de energia quando comparado aos demais compostos majoritários da planta (celulose e hemiceluloses), além de colaborar com o processo de compactação. De modo geral, em temperaturas superiores a 70°C a lignina começa a plasticizar, tornando-se maleável e permitindo melhor adesão entre as partículas durante o processo de densificação, resultando em *pellets* com melhores propriedades mecânicas (KALIYAN e MOREY, 2010).

Na literatura, observa-se para madeiras folhosas, o teor de lignina variando entre 26 e 29%, para o gênero *Eucalyptus*. Já em madeira de coníferas este valor varia entre 25 e 30%, para espécies do gênero *Pinus* (PROTASIO et al.; 2013; PEREIRA; 2014).

3.2.1.2. Aditivos

Aditivos são substâncias, geralmente, de origem orgânica, que são adicionados à massa de partículas de biomassa com finalidade de melhorar as propriedades dos *pellets*, além da possibilidade de reduzir as emissões por tornar a produção mais eficiente, podendo o mesmo ser adicionado até 2% da massa total dos *pellets* (DIN EN 14961-2, 2011).

Os aditivos também afetam o custo de produção de *pellets*, porém reduzem o desgaste na matriz de peletização, uma vez que facilita a passagem das partículas pela matriz de peletização e aumenta a resistência mecânica do combustível, gerando *pellets* com maior durabilidade mecânica e menor geração de finos (TUMURULU, 2011).

Os aditivos ou agentes ligantes comumente utilizados na produção de *pellets* são lignosulfonados, amido, e alguns óleos vegetais (TARASOV et al., 2013). Além desses, cita-se a lignina proveniente do processo *kraft*, conforme estudado por Pereira et al., (2013) oriundas de dois processos diferentes de precipitação, a lignina *LignoBoost* e a lignina *LignoForce*.

Os lignosulfonados são polímeros aniônicos solúveis em água obtidos como subproduto do processo de polpação sulfito da madeira (LEBO et al., 2001). No entanto, ressalta-se que esse é considerado o agente ligante mais efetivo, principalmente, para produção de rações pelletizadas.

Usualmente, para produção de *pellets* para fins energéticos, utiliza-se o amido como aditivo para aumentar a sua resistência. O amido é um polissacarídeo de reserva dos vegetais armazenado na forma de grânulos semicristalinos, formado por dois tipos de polímeros de glicose, a amilose e amilopectina, com estruturas e funcionalidades diferentes (MALI et al., 2010). A amilose é um polímero linear composto por unidades D-glicose unidas por ligações α -(1→4), com grau de polimerização de 200 a 3000, variando em função da fonte de amido. A amilopectina é um polímero altamente ramificado com unidades D-glicose ligadas através de ligações α -(1→4) e ramificações em α -(1→6) (ELLIS et al., 1998).

Para a utilização do amido como agente ligante na produção de *pellets*, deve-se destruir a estrutura granular semicristalina e originar uma matriz polimérica homogênea

e essencialmente amorfa (LIU, 2005; MALI et al., 2010). Destaca-se o fenômeno de gelatinização e fusão para destruição da organização dos grânulos de amido para produção de *pellets*.

A gelatinização consiste na transformação irreversível do amido granular em uma pasta viscoelástica que ocorre com o excesso de água, rompendo as ligações de hidrogênio. A fusão consiste no aquecimento do amido através de pequenas quantidades de água e elevada temperatura para acontecer a gelatinização. Após a gelatinização, as moléculas de amido começam a se reassociar através de ligações de hidrogênio, favorecendo a formação de uma estrutura mais ordenada (VAN SOEST et al., 1996; MALI et al., 2010).

A adição do amido à matéria-prima para a produção dos *pellets* deve ser associada, também, à aplicação de vapor d'água para que ocorra a fusão e gelatinização do amido. Com o aquecimento das partículas, alterações consecutivas ocorrem na biomassa, por exemplo, a desnaturação da proteína, gerando *pellets* com maior durabilidade e alta qualidade quando comparado com *pellets* sem aditivos, num processo produtivo onde a biomassa encontra-se com teor de umidade entre 8-12% (TUMURULU, 2011).

Além da atuação como agente ligante, o amido, durante a peletização, também atua como um agente lubrificante na matriz, facilitando o fluxo da matéria-prima densificada (TUMURULU, 2011).

As principais fontes comerciais de amido são o milho, batata, arroz, trigo e mandioca (ELLIS et al., 1998), contudo novos vegetais integram as fontes de amidos para uso industrial, por exemplo, a batata-doce, o inhame e a ervilha.

3.2.1.2.1 Amido de milho

O amido de milho é oriundo do beneficiamento do grão de milho, o qual é extraído do endosperma e que compõe em média 82% do grão, base seca. Os demais compostos compreendem o gérmen (11%), pericarpo ou casca (5%) e a ponta (2%) (PAES, 2006).

Em relação à composição química do grão de milho, é possível observar diferenças para cada parte que compõe o que resulta em diferentes produtos quando beneficiado (Tabela 1).

Tabela 1 – Percentagem do constituinte indicado nas estruturas físicas específicas do grão de milho.

Fração	Amido	Lipídeos	Proteínas	Açúcares	Minerais
	% da parte (base seca)				
Endosperma	98	15,4	74	28,9	17,9
Gérmen	1,3	82,6	26	78,4	69,3
Pericarpo	0,6	1,3	2,6	1,2	2,9
Ponta	0,1	0,8	0,9	0,8	1,0

Fonte: Adaptado de PAES, 2006

O amido de milho é extraído do endosperma do grão, o qual se apresenta como composto majoritário. Entretanto, cada subproduto obtido do grão de milho é composto por quantidades e partes diferentes do grão, o que permite a diversificação de uso tanto para alimentação humana direta e indiretamente, quanto para o uso industrial, por exemplo, no processo de densificação.

A utilização do amido de milho no processo de peletização tem como objetivo melhorar a resistência mecânica dos *pellets* devido à capacidade em formar uma massa viscoelástica quando submetido à mistura com água e temperatura. Esta característica só é possível devido à estrutura formada pelo amido e proteínas presente no produto após a moagem (THOMAS; ATWELL, 1999).

Como citado anteriormente, a formação da massa viscoelástica é oriunda do processo de fusão e gelatinização do amido, que está intimamente relacionada ao teor de amilose e amilopectina. Na maioria dos amidos, o teor de amilose varia em torno de 20 a 25%, já para algumas variedades de milho com elevado teor de amilose, estes valores variam de 50 a 85% (DENARDIN e SILVA, 2008).

Quanto às propriedades físicas do amido de milho, os grânulos apresentam diâmetro variando entre 5 e 25 μm , com superfície rugosa e angular. O teor de umidade é de aproximadamente $13,7 \pm 0,5\%$ (WEBER et al., 2009), e juntamente com as demais propriedades podem influenciar algumas características dos *pellets* durante e após a peletização, por exemplo, densidade, umidade e durabilidade.

Dessa forma, a aplicação do amido de milho, de uso comercial, ao processo de peletização, juntamente com vapor d'água, espera-se melhorias às propriedades mecânicas. Uma vez que, a formação da massa viscoelástica tem como objetivo unir as partículas de madeira e manter suas propriedades após o resfriamento e armazenamento.

3.2.1.2.2 Amido de trigo

O grão de trigo possui semente única com comprimento variando entre 6 e 8 milímetros e 3 a 4 milímetros de largura, onde o gérmen e os tricomas se encontram em extremidades opostas (SCHEUER et al., 2011). Entretanto, é constituído, basicamente por pericarpo (7,8 a 8,6%), endosperma (87 a 89%) e gérmen (2,8 a 3,5%) (QUAGLIA, 1991).

O endosperma consiste numa matriz proteica, onde estão presentes os grânulos de amido, ou seja, o endosperma constitui a farinha de trigo branca, propriamente dita (HADDAD et al., 2001). De acordo com as propriedades do endosperma, a textura do trigo pode variar em função da sua vitreosidade e dureza, que influencia diretamente no tamanho da partícula da farinha, a quantidade de amido resistente e a absorção de água (SCHEUER et al, 2011).

Quanto à composição química da farinha de trigo branca, esta é constituída por carboidratos (72 a 78%), sendo 72% amido; proteínas (8 a 16%); lipídeos (2%); umidade (12 a 14%) e cinzas (1%). Contudo, diferentes quantidades e características das composições podem ser observadas em função dos diferentes cultivares, o que influenciarão a qualidade da farinha de trigo (MORITA et al., 2002).

Além disso, no amido de trigo está presente cerca de 25% na forma de amilose, responsável pela absorção de água e pela formação da pasta viscoelástica (SCHEUER et al., 2011). Esta porção é responsável por unir as partículas durante a peletização, o qual irá agir juntamente com a lignina presente na madeira como aglutinante, resultando em *pellets* com elevada resistência mecânica.

3.2.1.2.3 Lignina Kraft

A lignina *kraft* é outro aditivo que se mostra promissor, uma vez que esta é coproduto da polpação *kraft* e é gerada em grandes escalas na indústria de celulose. Obtida a partir do licor negro, a sua separação e purificação podem ser realizadas por diversos processos industriais, destacando-se o processo *LignoBoost*.

O processo de extração da lignina *LignoBoost* é realizado em duas etapas; na primeira ocorre a adição de gás carbônico ao licor negro quente a 60 ou 80 °C, com pH entre 8-9, em seguida ocorre a filtração do licor negro, onde é possível extrair 75-80% de lignina. Na segunda etapa, o filtrado é concentrado por evaporação, e o licor é

novamente aquecido para facilitar a filtração, já que a frio ocorre a formação de colóides. O filtrado concentrado é tratado com ácido sulfúrico até pH final de 2-3, recuperando mais 10% de lignina (GARCÍA et al., 1984, citado por GOUVÊA, 2012).

Segundo Öhman et al. (2008) em 2007 foram produzidos 4.000 toneladas de lignina pelo processo *Lignoboost*, com um balanço de massa de 4.790 toneladas/dia de licor (30% de sólidos totais) para 348 toneladas/dia de lignina (70% de sólidos totais). Este método possui pequena quantidade de ácido, de modo a obter lignina com melhor pureza, propiciando a utilização da mesma para uso combustível.

Deste modo, à aplicação da lignina *kraft* como aditivo passa a ser uma forma de melhor utilização deste coproduto gerado, visto a possibilidade da mesma conferir melhores propriedades aos *pellets*, de forma a aumentar a resistência mecânica e propriedades energéticas, como estudos realizados por Berghel et al. (2013), Pereira (2014) e Whittaker e Shield (2017), os quais observaram melhorias nas propriedades mecânicas dos *pellets*.

3.2.2. Processo de peletização

Em termos gerais, a peletização consiste na densificação da biomassa por meio da aplicação de pressão em determinada massa de partículas com ou sem adição de aglutinantes e temperatura. No caso de madeira, a adição de agentes ligantes é variável, devido ao teor de lignina presente em cada biomassa e qualidade requerida.

Os *pellets* são combustíveis sólidos granulados obtidos da compactação de biomassa em uma matriz perfurada acoplada a uma prensa. A peletização otimiza as características da biomassa, gerando materiais de tamanho e forma homogênea, o que contribui para redução do volume, armazenamento e custo de transporte (WARAJANONT e SOPONPONGPIPAT, 2013).

Dentre os fatores que influenciam a peletização, destacam-se a temperatura da matriz e pressão exercida sobre a biomassa. Entre os fatores relacionados à matéria-prima destacam-se o teor de umidade, tamanho e forma das partículas, além da sua composição química. E estes são fatores que afetam, também, na qualidade da biomassa densificada (SHAW, 2008).

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

realizados por alguns autores mostram que temperatura acima de 90°C melhora significativamente as características dos *pellets*, além de exigir menor pressão de compactação com o aumento da temperatura da matriz (TABIL,1996; KALYIAN e MOREY, 2009).

A pressão de compactação varia de acordo com o tipo de matéria-prima a ser densificada. Maior densidade da matéria-prima exige maior pressão de compactação. Dessa forma, o aumento da pressão resulta no acréscimo significativo da densidade aparente do *pellet*. Contudo, quanto maior a pressão exercida, maior será o gasto de energia pela prensa peletizadora (TUMURULU, 2011).

A influência do teor de umidade está ligada com a composição química da matéria-prima, desempenhando um papel importante na formação dos *pellets*. Dessa forma, o teor de umidade pode influenciar a densificação de três maneiras: pela redução da temperatura abaixo da transição vítrea, impedindo o amolecimento e adesão entre as partículas; pela formação de uma camada sólida, devido às partículas não penetrarem na matriz de peletização; e aumento da área de contato entre as partículas por forças de Van der Waal's (TUMURULU, 2014).

Segundo Carvalho et al. (2013) a umidade da biomassa para peletização deve estar entre 8 e 15%. *Pellets* produzidos com biomassas com alto teor de umidade apresenta, de modo geral, baixa resistência mecânica em decorrência de fissuras em função da saída dos gases, principalmente vapor de água. Em consequência disso, reduzindo sua resistência e favorecendo a geração de finos durante seu manuseio. Por outro lado, o baixo teor de umidade dificulta a compactação da biomassa visto que a madeira apresenta baixa condutividade térmica, logo a presença de água colabora com o processo de transferência de calor, aumento da temperatura das partículas e consequentemente a plasticização da lignina, que por sua vez atua como um aglutinante natural da biomassa.

O tamanho e forma das partículas podem ser facilmente controlados por meio da classificação por peneiras. Warajanont (2013) sugere que as partículas apresentem cerca de 3 milímetros e com forma esbelta, salientando que o tamanho das partículas não deve ser maior que o diâmetro de cada furo da matriz de compactação.

3.2.3. Qualidade dos *pellets*

A qualificação dos *pellets* fornece resultados claros e precisos que permite a utilização de forma eficiente destes biocombustíveis em caldeiras e queimadores

modernos. Além disto, evita possíveis danos ao equipamento e ao operador, a obtenção da máxima quantidade de energia do *pellet* e facilitar a negociação entre comprador e vendedor.

Os *pellets* podem ser classificados de acordo com suas propriedades físicas, químicas, dimensionais e mecânicas. Para cada propriedade existe metodologia que se aplica de forma a padronizar os ensaios de qualificação dos *pellets*.

Entre as propriedades físicas, a densidade a granel representa a quantidade em massa de *pellets* contida em um recipiente de volume conhecido (DIN EN 15103, 2010). Dessa forma, *pellets* com maior densidade a granel é preferível por permitir o transporte e armazenamento de maior quantidade de massa. A densidade aparente unitária expressa à quantidade de massa de uma unidade de *pellet* por volume, que por consequência influencia diretamente a densidade a granel.

O teor de umidade também é uma propriedade que é utilizada, principalmente, na comercialização e no cálculo de outras propriedades. Para a qualificação dos *pellets* considera-se o teor de umidade, base seca, que é obtida pela relação entre a quantidade de água e a massa seca (DIN EN 14774-2, 2009). Além disso, *pellets* com elevado teor de umidade apresentam menor poder calorífico e baixa resistência mecânica, devido a influência da molécula água entre as partículas.

A composição química elementar tem como foco principal os elementos menores, que podem ser liberados durante a combustão e o teor de cinzas que afetam a qualidade dos *pellets* (DIN EN 15104, 2011). Com isso, opta-se pela utilização de matéria-prima e aditivos com menor percentagem de compostos químicos, por não contribuir positivamente à combustão.

O poder calorífico superior expressa à quantidade de energia contida numa massa de madeira totalmente seca. Quando leva em consideração o teor de umidade, base seca, este é conhecido por poder calorífico útil (DIN EN 14918, 2010), sendo considerável para o consumidor final, pois representa de modo real o uso dos *pellets* na produção de energia ou aquecimento. Dessa forma, o uso de matéria-prima com teor de umidade adequado ao indicado para produção de *pellets* é essencial para gerar combustível com baixo teor de umidade e elevado poder calorífico útil.

Quanto às propriedades dimensionais, o diâmetro pode variar de acordo com a matriz de peletização. Geralmente são utilizadas matrizes com 6 ou 8 milímetros de diâmetro. Contudo, após a peletização ocorre o resfriamento dos *pellets* que podem sofrer expansão, devido à taxa de retorno do material. O comprimento é regulado pelas das facas de corte que são acopladas a matriz e variam entre 3,15 e 40 milímetros de

comprimento (DIN EN 16127, 2012). As propriedades dimensionais apresentam efeito direto sobre a densidade a granel e, além disso, a padronização das dimensões facilita o uso do combustível em equipamentos de queimas modernos.

As propriedades mecânicas são importantes para que durante o manuseio e impactos sofridos pelos *pellets* desde a produção até a chegada ao equipamento de queima não ocorra a sua desintegração. A durabilidade mecânica é uma das propriedades que expressa a quantidade, em massa, de *pellets* que se desintegraram em relação à massa inicial produzida. O teor de finos é expresso pela quantidade de pó presente numa amostra em relação à massa inicial (DIN EN 15210-1, 2010), o qual pode aumentar o risco de incêndios durante o armazenamento e transporte dos *pellets*. Outra propriedade menos exigida é a dureza, que é obtida através de um durômetro que pressiona o *pellet* até que ocorra a sua desintegração, fornecendo como resultado final a força máxima suportada, permitindo estimar o fator de empilhamento do produto.

Além das metodologias para qualificação dos *pellets*, há também normativas ao qual exigem valores que são levados em consideração no momento da comercialização (ANEXO A, B, C e D). Estes valores devem ser atingidos pelos produtores de modo a garantir a qualidade dos *pellets* e proporcionar o uso pelo consumidor de forma segura e sem causar danos ao ambiente.

Em virtude dos diversos fatores que afetam a qualidade dos *pellets*, os produtores buscam, de modo geral, valores ótimos destas propriedades para atender as normativas de comercialização e padronização do produto. Entretanto, devido ao elevado rigor das normas e a necessidade de integrar os *pellets* na matriz energética, o uso de aditivos são possibilidades para melhoria do produto e atender o mercado consumidor frente aos acordos ambientais firmados e as normativas, principalmente europeia.

Devido ao reduzido incentivo no setor e o baixo desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao setor de *pellets*, o Brasil não apresenta nenhuma normativa vigente de comercialização. Dessa forma, com a obtenção dos valores das propriedades em laboratório, através das metodologias de qualificação, são comparados ao estabelecido pela normativa vigente para cada país ou de opção do consumidor final.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material experimental

4.1.1. Fonte de biomassa

Para a produção dos *pellets*, em escala laboratorial, foram selecionadas e colhidas duas árvores de *Pinus taeda* de diâmetro médio da população e 30 anos de idade. As árvores foram colhidas em plantio experimental pertencentes ao Departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Viçosa. De cada árvore foram retirados cinco discos correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco. De todos os discos, foram retiradas duas cunhas opostas, utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira. O restante do disco foi seccionado e moído para determinação da densidade a granel, teor de umidade, composição química elementar, composição química estrutural, composição química imediata e poder calorífico superior.

Para produção das partículas utilizou-se toras de madeira sem casca, que inicialmente foram transformadas em tábuas e depois em partículas tipo “flocos”. Posteriormente, os flocos foram transformados em partículas em um moinho martelo, as quais foram classificadas em peneiras de 3 e 1 milímetro, utilizando a fração retida na peneira de 1 mm. Em seguida as partículas foram secas em estufa de circulação forçada de ar a $45 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem 12% de umidade, base seca, para produção dos *pellets*.

4.1.2. Fontes de aditivos

Foram utilizados dois aditivos de amido e um de lignina *kraft*, que foram adicionados a massa de partículas de madeira. Optou-se por utilizar o amido de trigo e amido de milho vendido comercialmente no mercado local de Viçosa-MG (Anexo E) pela facilidade de aquisição dos mesmos. Contudo, ressalta-se que o uso de resíduos de varrição de fábricas pode ser uma alternativa para redução dos custos com aditivos. A lignina *kraft* foi doada por uma empresa multinacional produtora de polpa celulósica e papel, a qual utiliza o processo *LignoBoost* para extração da lignina.

Foram adicionadas diferentes porcentagens de aditivo (1, 2, 3, 4 e 5%) em relação à massa seca de partículas.

4.2. Caracterização do material experimental

A densidade básica da madeira foi determinada por meio do método hidrostático, com imersão em água, segundo a NBR 11941 (ABNT, 2003). A densidade a granel da madeira e dos aditivos foram obtidas em amostras de 100 cm³ por meio de uma balança analítica, com precisão de 0,0001 g, determinando-se a massa de cada amostra acondicionada em recipiente de volume conhecido.

O teor de umidade, base seca, foi determinado em uma balança determinadora de umidade, modelo MB35 Halogen. O aparelho é composto por balança de precisão e unidade de secagem por luz halógena. O equipamento opera segundo o princípio termogravimétrico para secar as amostras que são colocadas no seu interior. Dessa forma, determina-se o teor umidade da amostra pela mensuração da sua massa e secagem até massa constante.

Para determinação do poder calorífico superior (PCS), composição química imediata, composição química estrutural e elementar da madeira, as partículas de madeira foram transformadas em serragem, através de um moinho de facas, de acordo com a norma TAPPI 257 cm-85 (TAPPI, 1985). Depois as amostras foram classificadas em peneiras e utilizadas às frações que passarem pela peneira de 40 mesh e retida na peneira de 60 mesh. Para a determinação da composição elementar da madeira utilizou-se a fração que passou pela peneira de 200 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh. Para os aditivos, não foi necessário realizar a moagem, devido a obtenção do material já na forma de pó, portanto realizou-se somente a classificação por peneiras.

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido de acordo com a norma DIN EN 14918 (DIN, 2010), utilizando uma bomba calorimétrica adiabática *IKA300*[®]. A estimativa do poder calorífico útil foi realizada utilizando a Equação 2, conforme o Anexo E da norma EN 14918 (DIN, 2010).

$$PCU_{\text{(pressão constante)}} = (PCS - 212,2 * H - 0,8*(O + N)) * (1 - 0,01 * M) - (24,43 * M) \quad (2)$$

Onde:

PCU_(pressão constante): poder calorífico útil em pressão constante, em J.g⁻¹;

PCS: poder calorífico superior, em J.g⁻¹;

H, O, N: hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, respectivamente, em porcentagem (%);

M: umidade, base úmida, em porcentagem (%);

Constantes: A energia de vaporização (pressão constante) para a água a 25 °C é de 44,01 kJ.mol⁻¹. Isto corresponde a 218,3 J.g⁻¹ para 1% de hidrogênio (m/m) ou 24,43 J.g⁻¹ para 1% de umidade (m/m) na amostra.

A composição química imediata da madeira foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986) para as determinações do teor de materiais voláteis, teor de cinzas e por diferença o teor de carbono fixo, em base seca.

Para determinar a composição química molecular da madeira, inicialmente foi obtido o teor de extrativos, conforme a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), apenas alterando o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno. O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason, modificado (GOMIDE; DEMUNER, 1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria (GOLDSCHIMID, 1971). O teor de lignina total foi obtido somando-se os valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose (celulose e hemiceluloses) foi obtido por diferença dos teores de extrativos, lignina total e cinzas, decrescido de 100.

A composição química elementar (carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre) foi determinada de acordo com a norma EN 15104 (DIN, 2011). O equipamento utilizado foi o *Vario Micro Cube CHNS, Elementar*[®]. O percentual de oxigênio foi determinado por diferença do carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas decrescido de 100, conforme a norma EN 15296 (DIN, 2011).

4.3. Produção dos *pellets*

Para produção dos *pellets* foram utilizadas partículas com aproximadamente 12% de umidade, em base seca, com desvio de $\pm 1,0\%$. A umidade proposta foi utilizada conforme valores observados na literatura para produção de *pellets* de madeira de *Pinus sp.*

A mistura da massa de partículas com cada porcentagem de aditivo foi realizada de forma manual, onde, inicialmente, pesou-se a quantidade de aditivo a ser adicionado, em relação à massa seca, em seguida, os mesmos foram misturados às partículas de madeira. Foram utilizados sacos plásticos para a mistura e homogeneização da composição das partículas. Após a mistura, determinou-se, novamente, o teor de umidade, em base seca, da massa de partícula com o aditivo para, em seguida, realizar a produção dos *pellets*.

Os *pellets* foram produzidos em uma prensa peletizadora laboratorial da marca *Amandus Kahl*, modelo *14-175* com capacidade para produção de 30 kg.h^{-1} . A temperatura média de peletização foi de 95°C . Para atingir essa temperatura em menor tempo, a matriz de peletização foi pré-aquecida em óleo a 200°C por aproximadamente

30 minutos para posterior montagem na prensa, minimizando o uso de partículas para o aquecimento.

Para alimentação da pelletizadora utilizou-se um sistema composto por um motoredutor, um controlador de velocidade e uma rosca-sem-fim. Para produção dos *pellets* foram instalados, ao longo da rosca-sem-fim, três bicos de injeção de vapor produzido por uma autoclave. O vapor injetado operou a uma pressão entre 0,5 a 1 kgf/cm² e temperatura média de 123°C.

Produziu-se aproximadamente 4 kg de *pellets* por tratamento. Após a sua produção, os *pellets* foram resfriados a temperatura ambiente e condicionados em sacos plásticos até a realização dos ensaios.

4.4. Caracterização dos *pellets*

A densidade a granel dos *pellets* foi obtida de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010), onde as amostras foram condicionadas a 65% de umidade relativa e 20°C de temperatura. A densidade relativa aparente foi obtida conforme o método descrito por Vital (1984), por meio da imersão do *pellet* em mercúrio, onde foram analisadas cinco unidades por tratamento.

O teor de umidade, base seca, dos *pellets* foi obtido conforme norma EN 14774-2 (DIN, 2009).

Para determinar o poder calorífico superior (PCS), composição química imediata e realização da análise termogravimétrica, os *pellets* foram transformados em serragem, através de um moinho de facas, de acordo com a norma TAPPI 257 cm-85 (TAPPI, 1985). As amostras de serragem foram classificadas em peneiras e utilizadas às partes que passarem pela peneira de 40 mesh e retida na peneira de 60 mesh.

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido de acordo com a norma DIN EN 14918 (DIN, 2010), utilizando uma bomba calorimétrica adiabática IKA300®. A estimativa do poder calorífico útil foi realizada utilizando a Equação 4, conforme o Anexo E da norma EN 14918 (DIN, 2010).

$$PCU_{\text{(pressão constante)}} = (\text{PCS} - 212,2 * H - 0,8*(O + N)) * (1 - 0,01 * M) - (24,43 * M) \quad (4)$$

Onde:

PCU_(pressão constante): poder calorífico útil em pressão constante, em J.g⁻¹;

PCS: poder calorífico superior, em J.g⁻¹;

H, O, N: hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, respectivamente, em porcentagem (%);

M: umidade, base úmida, em porcentagem (%);

Constantes: A energia de vaporização (pressão constante) para a água a 25 °C é de 44,01 kJ.mol⁻¹. Isto corresponde a 218,3 J.g⁻¹ para 1% de hidrogênio (m/m) ou 24,43 J.g⁻¹ para 1% de umidade (m/m) na amostra.

A densidade energética (GJ/m³), com base no poder calorífico útil, foi obtida seguindo mesma metodologia, contudo, levando em consideração o poder calorífico útil.

A composição química imediata dos *pellets* foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986) para as determinações de teor de materiais voláteis, teor de cinzas e por diferença o teor de carbono fixo, em base seca.

A durabilidade mecânica e a porcentagem de finos (partículas menores que 3,15 mm) foram determinadas utilizando-se o equipamento Ligno-Tester, Holmen®, de acordo com a norma EN 15210-1 (DIN, 2010).

A dureza, em kg, foi determinada pelo ensaio de compressão diametral do *pellet* em um durômetro manual com escala de 0 a 100 kgf, da marca *Amandus Kahl*. Um *pellet*, por vez, foi inserido no durômetro e foi aplicada carga crescente, até fratura da amostra. Então, fez-se a leitura da carga máxima que um *pellet* pode suportar antes de romper. Foram avaliados 10 *pellets* por tratamento.

O diâmetro e comprimento dos *pellets* foram obtidos através de um paquímetro digital, conforme norma EN 16127 (DIN, 2012). Foram avaliados 10 *pellets* por tratamento.

4.4.1. Classificação dos *pellets*

A classificação dos *pellets* foi realizada de acordo com a norma alemã EN 14961-2 (DIN, 2011) e utilizada para fins de comparação da qualidade dos *pellets* produzidos neste trabalho.

4.5. Delineamento experimental

4.5.1. Propriedade das matérias primas

As matérias primas foram analisadas segundo um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (madeira de *Pinus sp.*, amido de trigo, amido de milho e lignina *kraft*). Para tanto, primeiramente realizou-se o teste de *Lilliefors* para testar a normalidade, e *Cochran* para testar a homogeneidade das variâncias. Em

seguida os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a nível de 5% de significância e quando observada diferença significativa entre os tratamentos, eles foram submetidos ao teste de comparação múltipla de Tukey, em nível de 95% de probabilidade.

4.5.2. Propriedades dos *pellets*

O desenvolvimento deste estudo foi realizado de acordo com um delineamento inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial com três aditivos (farinha de trigo, amido de milho e lignina *kraft*) e seis diferentes porcentagens (0,1, 2, 3, 4 e 5%), conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Delineamento experimental

Aditivos	Porcentagens (%)					
Trigo (TRI)	1	2	3	4	5	Testemunha (0%)
Milho (MIL)	1	2	3	4	5	
Lignina (LIG)	1	2	3	4	5	

Os dados foram submetidos ao teste de *Lilliefors*, para testar a normalidade, e *Cochran*, para testar a homogeneidade das variâncias. Os resultados foram submetidos a análise de variância (ANOVA), pelo Teste F, em nível de 5% de significância. Quando estabelecido diferenças significativas entre os tratamentos, ajustou-se um modelo polinomial quadrático ($Y = ax^2 + bx + c + \varepsilon$) levando em consideração o coeficiente de determinação (R^2) no erro padrão residual e na distribuição dos resíduos.

As análises foram realizadas com o auxílio dos programas *STATISTICA 10* (STATSOFT, 2011) e o ajuste dos modelos com *Microsoft Office* (pacote *Excel 2010*).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Propriedades das matérias primas

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios das propriedades da madeira e dos aditivos utilizados para a produção dos *pellets*.

Tabela 3 – Valores médios das propriedades das partículas de madeira e dos aditivos

Propriedade	<i>Pinus sp.</i>	Farinha de Trigo	Amido de Milho	Lignina Kraft
Densidade a granel (kg/m ³)	129,68 d	1639 b	1131 c	1882 a
Teor de umidade (%)	12,35 a	12,14 a	13,14 a	8,24 b
Poder calorífico superior (kcal/kg)	4939 b	4441 c	4220 d	6282 a
Poder calorífico útil (kcal/kg)	3994 b	3497 c	3287 d	5449 a
Teor de Cinzas (%)	0,18 c	0,73 b	0,07 c	1,15 a
Materiais voláteis (%)	84,87 b	83,43 b	97,46 a	70,04 c
Carbono fixo (%)	14,96 b	15,84 b	2,47 c	28,81 a
C (%)	49,41 b	43,72 c	40,52 d	66,15 a
N (%)	1,06 b	3,05 a	0,93 b	0,20 c
H (%)	6,05 ab	6,86 a	6,31 ab	5,60 b
S (%)	0,06 b	0,51 b	0,02 b	2,35 a
O (%)	43,24 c	45,86 b	52,23 a	23,35 d
Teor de Lignina Total (%)	30,51	NA	NA	NA
Teor de extrativos Total (%)	11,67	NA	NA	NA
Teor de holocelulose (%)	57,64	NA	NA	NA
Densidade básica (kg/m ³)	406	NA	NA	NA

NA: Não se aplica. Médias seguidas de mesma letra, na linha, não apresentam diferença significativa entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Verifica-se que a lignina *kraft* possui significativamente maior densidade a granel em relação aos demais aditivos e madeira. Este valor foi observado devido as diferentes composições químicas dos aditivos, principalmente, ao tamanho molecular, o que influencia diretamente a massa molecular das partículas.

A estrutura molecular da lignina é maior quando comparada à molécula do amido além de ser mais compacta, o que resulta em maior peso molecular. A madeira apresenta densidade a granel significativamente inferior aos aditivos devido sua granulometria.

O teor de umidade da lignina *kraft* foi significativamente menor em relação aos demais. Isto ocorreu devido à composição química da lignina, uma vez que a molécula é formada por unidades de fenilpropano e apresentar em sua estrutura ligações C-C e C-O-C (ZHU, 2013), conferindo-lhe menor higroscopicidade.

Para produção de combustíveis densificados, recomenda-se valores entre 5-12% de umidade para produção de *pellets* de boa qualidade em termos de densidade e propriedades de armazenamento a longo prazo (LI e LIU, 2000). Portanto, observa-se que tanto a madeira quanto os aditivos estão aptos à produção de *pellets*.

Cabe salientar que o teor de umidade afeta, além da temperatura da matriz, a temperatura de transição vítrea das partículas, onde elevados valores de umidade impedem a densificação e ligação entre partículas, sendo, portanto, essencial o seu controle.

O poder calorífico superior da lignina foi superior aos demais aditivos empregados e também em relação à madeira, e isso se deve a sua estrutura molecular formada por unidades de fenilpropano, tendo maior proporção de carbono na sua composição química. Além disso, a maior quantidade de oxigênio observada na composição dos amidos e da madeira colaboram para a redução do poder calorífico destas matérias-primas. Logo, espera-se que os *pellets* produzidos com lignina apresentem, também, maiores valores médios de poder calorífico.

O poder calorífico útil dos aditivos a base de amido apresentaram menor valor médio devido ao elevado teor de umidade e maior percentual de compostos elementares (oxigênio e nitrogênio), os quais não contribuem energeticamente.

Observa-se quanto a presença de minerais, que a lignina *kraft* apresenta significativamente maior teor de cinzas que os demais, e isso se deve a presença de compostos inorgânicos residuais do processo de sua extração do licor negro. Salienta que elevados teores de cinzas influenciam negativamente a combustão e são indesejáveis para *pellets* devido à relação inversa sobre o PCS (OBERNBERGER e THEK, 2010).

Já para os aditivos amiláceos e a madeira, observou-se menores teores de cinzas e elevados teores de materiais voláteis. Os menores teores de materiais voláteis observados nos aditivos a base de amido se devem à suas composições químicas que apresentam em sua estrutura moléculas de amilose e amilopectina em grandes proporções, às quais são mais instáveis termicamente em relação a lignina. Dessa forma, a presença de aditivos amiláceos na composição dos *pellets* implica em liberação de energia mais rápida quando comparado ao uso da lignina *kraft*.

Os teores de carbono fixo e carbono elementar da lignina *kraft* foi significativamente maior em relação as demais matérias primas. Isso é devido a sua composição estrutural, uma vez que a molécula de lignina é aromática, sendo formada por grupos de fenilpropano com maior quantidade de ligações C-C e C-O-C, resultando em maior estabilidade térmica quando comparado aos demais aditivos. Dessa forma, no processo de combustão a sua queima ocorre em maior período de tempo no estado sólido (BRAND, 2010).

Para produção de *pellets* aditivados, opta-se por aditivos com maior teor de carbono e hidrogênio por contribuir positivamente para geração de energia (REIS et al., 2012). Verificou-se que o teor de hidrogênio da lignina *kraft* foi ligeiramente menor em relação aos demais, porém apresentou, conforme mencionado acima maior teor de carbono.

O nitrogênio é um composto que tem pouca significância no potencial energético das biomassas, contudo, teor superior a 0,6% é indesejável durante a combustão, devido à formação de compostos nitrogenados tóxicos, como NO_x, N₂O e HCN, e são prejudiciais ao meio ambiente. (OBERNBERGER et al., 2006; TUMULURU et al., 2011). Observa-se que, de modo geral, os amidos apresentam alto teor de nitrogênio, e isso se deve às proteínas e lipídeos presentes na composição química do grão de amido, o qual confere dureza ao endosperma do grão de trigo (THOMAS; ATWELL, 1999).

O teor de enxofre da lignina *kraft* foi significativamente superior aos observados nos aditivos amiláceos e na madeira. Isto se deve ao processo de obtenção da lignina oriunda do licor negro e aos processos de extração e purificação, os quais não são suficientes para retirada do enxofre residual (JOHANSSON, 2013), contudo, a presença deste composto tem maior influência no processo de combustão do que no processo de peletização, onde são liberados à atmosfera.

Observa-se que o teor de oxigênio foi maior nos aditivos amiláceos, tendo o amido de milho o maior percentual deste elemento em relação aos demais. Em decorrência dos amidos serem compostos por moléculas de glicose e maior quantidade hidroxilas em sua estrutura (THOMAS e ATWELL, 1999) justifica o maior teor de oxigênio quando comparadas à madeira e a lignina *kraft*. Vale ressaltar que o oxigênio é um elemento essencial para promover a combustão, contudo apresenta efeito contrário ao carbono e hidrogênio, participando de forma negativa na geração de energia, provocando a redução do poder calorífico do biocombustível (PROTASIO et al., 2011).

Os valores médios da composição química estrutural obtidos neste estudo corroboram com os observados na literatura para produção de densificados, como os

verificados por Pereira (2014) em estudos com diferentes biomassas para produção de *pellets*, que apresentaram, respectivamente, 69,42; 3,92 e 30,35% de holoceluloses, teor de extrativos e teor de lignina em madeira de *Pinus*.

Foi observado para madeira de *Pinus sp.* o valor médio de densidade básica dentro dos intervalos sugeridos para o processo de peletização. Opta-se por madeira de menor densidade básica, pois demandam potências menores dos equipamentos de peletização e em consequência disso, menor consumo de energia. Além disso, os principais países produtores e consumidores tem como base o uso de *pellets* de coníferas (TUMURULU, 2011).

5.2. Propriedades dos *pellets*

5.2.1. Propriedades dimensionais dos *pellets*

As propriedades dimensionais (diâmetro e comprimento) representam o comportamento dos *pellets* após a saída da matriz de peletização e resfriamento, onde se opta por materiais com menor variação dimensional, reduzindo a possibilidade de desintegração durante o transporte e movimentação, melhor homogeneidade do combustível, e possíveis influências no processo de queima.

Para o diâmetro verificou-se efeito significativo da quantidade de aditivo adicionada, conforme pode ser observado na Figura 1.

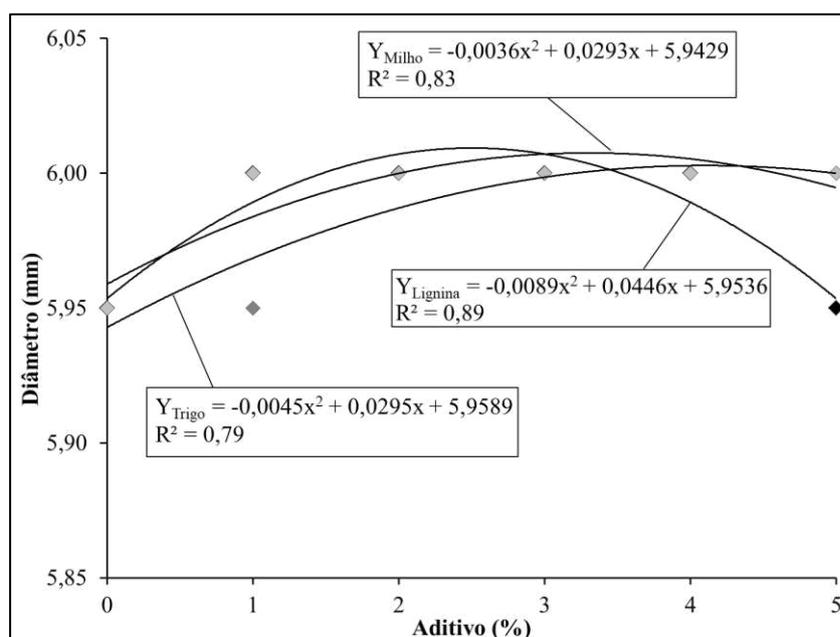


Figura 1 – Valores médios observados e estimados para diâmetro (mm) dos *pellets* em função da porcentagem de aditivo

Vale salientar que mesmo o diâmetro da matriz de peletização ser um parâmetro fixo, houve variações no diâmetro dos *pellets* em função dos tratamentos, uma vez que, a composição química e as propriedades físicas dos aditivos são distintas, o que influencia na taxa de retorno em diâmetro devido, principalmente, a higroscopicidade e tempo de retenção na matriz de compactação. Estas variações no diâmetro dos *pellets* podem acarretar trincas e geração de finos, reduzindo indiretamente as propriedades mecânicas, além de aumento no risco de incêndios.

Observa-se pequenas diferença no diâmetro dos *pellets*, com variações correspondentes a 0,05 milímetros, no entanto, tal variação foi suficiente para apresentar interação significativa. Os pellets produzidos sem aditivo (0%) apresentou menor diâmetro quando comparado aos demais, e isso se deve à melhor densificação das partículas que, provavelmente, promoveu menor taxa de retorno dos mesmos após a saída da matriz de peletização.

Por outro lado, os *pellets* produzidos com aditivo à base de amido tiveram os maiores valores médios de diâmetro, devido ao inchamento do amido, o que é justificado pelas ações de fusão e gelatinização, onde há maior absorção de água.

Observa-se que os *pellets* aditivados com lignina kraft tiveram seu diâmetro médio reduzido quando se adicionou 5%. Isso se deve a lignina agir como agente ligante das partículas e criar um filme na superfície externa dos *pellets* impedindo a função de inchamento, além disso, estes tratamentos apresentaram tendência de redução com o aumento da porcentagem deste aditivo, em função das propriedades menos hidrofílicas da lignina e sua estabilidade quando comparada aos demais aditivos.

Além da taxa de retorno, o tempo de retenção dos *pellets* na matriz de peletização também influencia no diâmetro, onde maior tempo de retenção implica em menor expansão (TUMURULU et al., 2011). Segundo Li e Liu (2000) tempo de retenção de 10 segundos podem resultar em aumento de 5% na densidade do *pellet*, refletindo numa taxa de retorno maior após a saída da matriz de peletização, e posteriormente ocorre a sua diminuição com o tempo até que atinja volume constante para uma mesma massa.

Pode-se observar também que os tratamentos que apresentaram maiores densidade resultaram em menor variação dimensional, mantendo-se inferior a 6 milímetros. Todos os tratamentos adequaram-se à norma de comercialização EN 14961-2 (DIN, 2011), que exige valor de diâmetro igual a 6 ± 1 milímetro.

Outra propriedade dimensional dos *pellets* é o comprimento, e pode ser regulada 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. Neste estudo foi observada interação significativa somente para o aditivo de farinha de trigo e suas porcentagens (Figura 2). Os tratamentos aditivados com amido de milho e lignina kraft não apresentaram efeito significativo, e apresentaram valores médios de 19,65 e 19,62 milímetros, respectivamente.

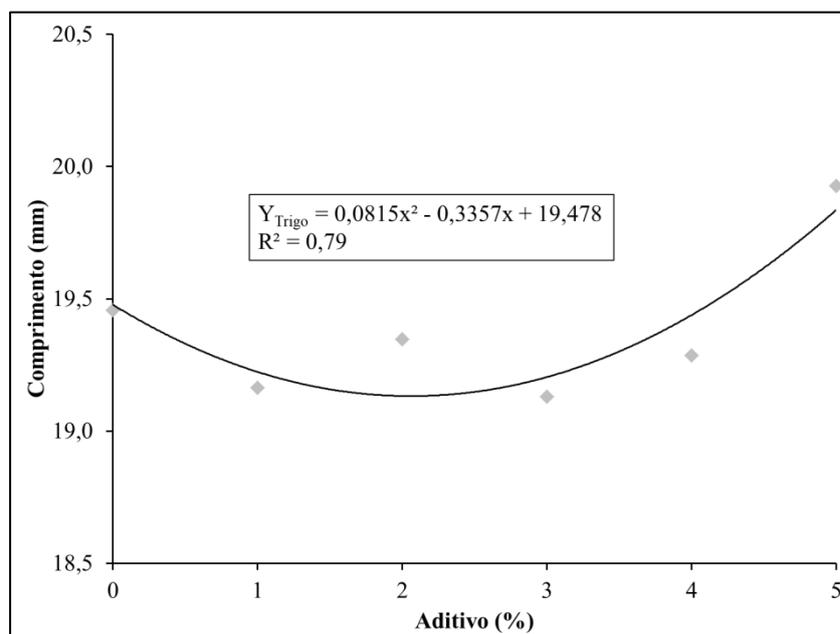


Figura 2 – Valor médio observado e estimado para comprimento (mm) dos *pellets* em função da porcentagem de aditivo de farinha de trigo

Observa-se que apesar de ocorrer efeito significativo da adição de farinha de trigo no comprimento dos *pellets*, o maior valor médio foi verificado para os produzidos com 5%. Esta variação é decorrente da maior dureza dos *pellets*, sendo, o momento entre a saída da matriz até o contato com a faca de corte, os *pellets* aditivados com 5% de farinha de trigo não se rompem, apresentando maior comprimento.

Além da influencia sobre as propriedades físicas, por exemplo, na densidade a granel, Whittaker et al. (2017) citam que o maior comprimento dos *pellets* apresenta aumento significativo na durabilidade dos mesmos, além das extremidades dos *pellets* serem pontos frágeis e a via principal para adsorção de água, levando ao aumento do teor de umidade e, como consequência, redução da durabilidade dos *pellets*.

Em vista da padronização, observou-se também que todos os *pellets* atenderam ao intervalo exigidos pela norma de comercialização EN 14961-2 (DIN, 2011), que estabelece que o comprimento deve estar entre 3,15 a 40 milímetros.

5.2.2. Propriedades físicas dos *pellets*

De acordo com a análise de regressão houve efeito significativo da quantidade de aditivo na densidade a granel apenas para os *pellets* produzidos com amido de trigo (Figura 3). Para os produzidos com amido de milho e lignina kraft os valores médios foram 642 e 659 kg.m⁻³, respectivamente.

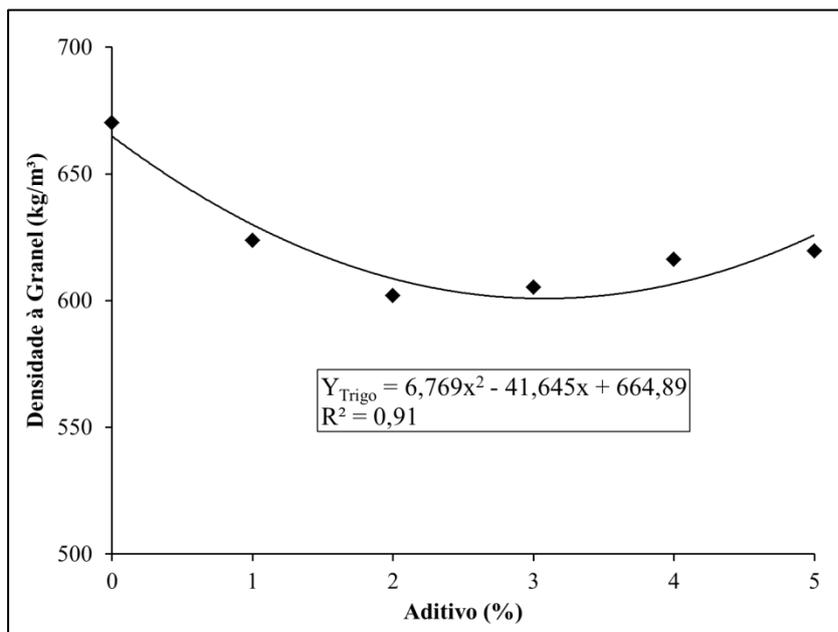


Figura 3 – Valores médios observados e estimados para densidade a granel dos *pellets* aditivados com amido de trigo, em função da porcentagem de aditivo

Observa-se uma redução da densidade a granel dos *pellets* até a adição de 3% de amido de trigo, com um ligeiro aumento nas adições subsequentes. Em vista dos valores observados para densidade a granel dos aditivos (Tabela 3), esperava-se que o uso destes resultaria no aumento da densidade a granel dos *pellets* devido a sua granulometria e massa molecular. Contudo, tal comportamento não foi observado, apresentando valores inferiores aos *pellets* que não receberam aditivos (0%).

Além disso, outro fator que afeta esta propriedade está associado à saída do *pellet* da matriz, na fase de resfriamento. Nesta fase do processo ocorre o aumento do volume unitário devido à retirada da pressão, resultando em maior taxa de retorno dos *pellets*, e por consequência, maior variação dimensional (Figuras 1 e 2) e menor densidade a granel (TARASOV et al., 2013).

Segundo a norma europeia de comercialização EN 14961-2 (DIN, 2011) para densidade a granel são exigidos valores maiores ou iguais a 600 kg.m⁻³. Desta forma,

observa-se que todos os tratamentos apresentaram valores superiores ao mínimo exigido pela norma, evidenciando o potencial de utilização dos aditivos no processo de peletização. Vale ressaltar que esta mesma normativa permite, no máximo, a adição de 2% de aditivo em relação à massa seca de matéria-prima para produção dos *pellets*.

A densidade relativa aparente indica a quantidade de massa unitária do *pellet* por volume. De acordo com os resultados não houve efeito significativo dos tratamentos na densidade aparente dos *pellets* apresentando valor médio igual a 1.176 kg.m^{-3} .

O teor de umidade, base seca, dos *pellets* não apresentaram interação significativa entre aditivos e porcentagens, tendo apenas efeito isolado dos tipos de aditivos, tendo os produzidos com lignina kraft menor teor de umidade (b.s) quando comparado com os demais, conforme pode ser observado na Figura 4.

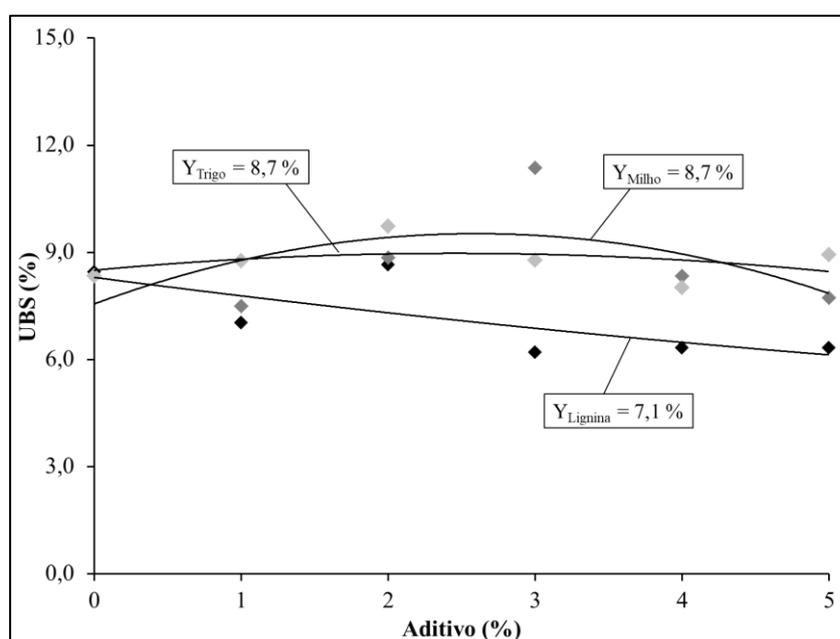


Figura 4 – Valores médios observados e estimados para teor de umidade, base seca (%) dos *pellets* em função da porcentagem de aditivo

Observa-se que os *pellets* aditivados com lignina kraft, apresentam redução média de 15% do teor de umidade, base seca, quando comparados aos *pellets* sem aditivo (0%). Isto ocorre devido a lignina kraft ser formadas por grupos fenólicos, com ligações C-C e C-O-C, conferindo baixa higroscopicidade (ZHU, 2013).

Por outro lado, os *pellets* produzidos com aditivos à base de amido de milho e farinha de trigo apresentaram comportamento semelhante, ou seja, apresentaram valores médios significativamente iguais.

Isso se deve a composição química semelhante dos aditivos amiláceos, constituídos por amilose e amilopectina, que contém maior número de hidroxilas livres

(OH) quando comparado à molécula de lignina. Dessa forma, as médias do teor de umidade dos *pellets* aditivados com amidos apresentam valor médio superior aos aditivados com lignina kraft.

A norma de comercialização EN 14961-2 (DIN, 2011) estabelece valores inferiores a 10% de umidade, base seca. Observa-se que todos os tratamentos adequaram à normativa.

5.2.3. Propriedades químicas dos *pellets*

De acordo com os resultados houve efeito significativo da quantidade de aditivo somente para os *pellets* produzidos com amido de milho, conforme observado na Figura 5 e 6, respectivamente, para poder calorífico superior e útil.

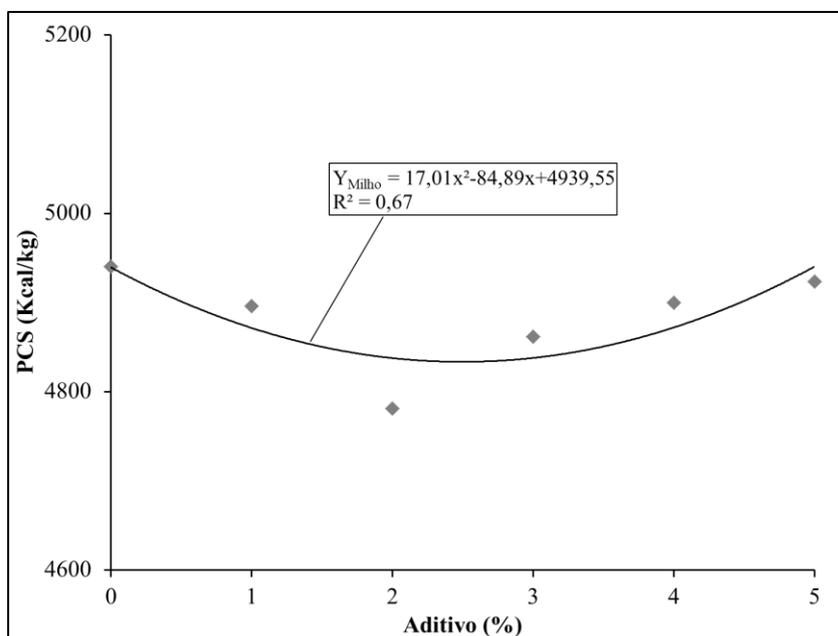


Figura 5 – Valores médios observados e estimados para o poder calorífico superior dos *pellets* em função da porcentagem de aditivo

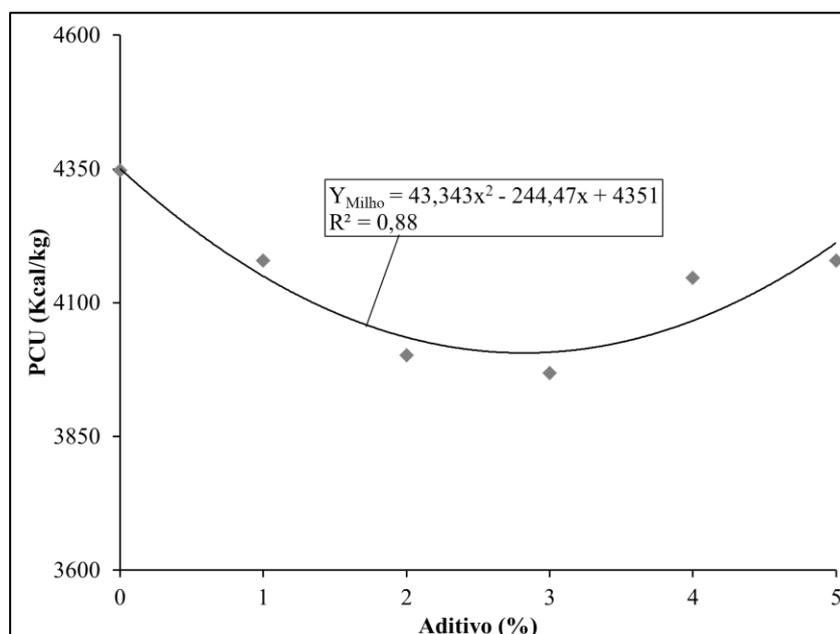


Figura 6 – Valores médios observados e estimados para o poder calorífico útil dos *pellets* em função da porcentagem de aditivo

Observa-se para os *pellets* produzidos com amido de trigo e lignina kraft os valores médios para poder calorífico superior foram 4858 e 4909 kcal.kg⁻¹, respectivamente. Para poder calorífico útil os valores médios foram 4054 e 4209 kcal.kg⁻¹, respectivamente, sendo esta diminuição atribuída ao teor de umidade dos aditivos utilizados.

Os tratamentos aditivados com amido de milho apresentam incremento no poder calorífico superior (Figura 5) em porcentagens acima de 2%; contudo tal comportamento não era esperado, uma vez que o poder calorífico superior do amido de milho (Tabela 3) é inferior ao da madeira, além de maior teor de oxigênio contido no aditivo, o que poderia reduzir o PCS do *pellet*.

Quanto ao poder calorífico útil, os tratamentos aditivados com amido de milho apresentaram redução até a adição de 3% deste aditivo, devido o efeito do teor de umidade sobre esta propriedade, sendo parte da energia produzida através da oxidação dos demais compostos do *pellet* aditivado, consumido e liberado como vapor no processo de combustão (PROTASIO et al., 2011). Na figura 4, observa-se que o teor de umidade dos *pellets* aditivados com amido de milho reduz em porcentagens acima de 4%, o que justifica o aumento do PCU.

Verifica-se que todos os tratamentos foram superiores ao mínimo estipulado pela norma EN 14961-2 (DIN, 2011), que exige valores de PCU variando entre 16,5 e 19 MJ.kg⁻¹, o que corresponde a 3940 e 4538 kcal.kg⁻¹, dessa forma, todos os tratamentos apresentaram-se aptos a comercialização segundo esta norma.

Outra propriedade dos *pellets* que traz vantagem em relação aos demais combustíveis está relacionada à maior densidade energética. Isto implica no transporte de maior quantidade de energia por volume conhecido, reduzindo custos, e por armazenar maior quantidade energética. Para utilização industrial, a densidade energética, com base no poder calorífico útil, fornece valores que levam em consideração o teor de umidade do biocombustível. De acordo com os resultados, somente os tratamentos aditivados com lignina kraft não apresentaram efeito significativo da quantidade de aditivo, conforme observado na Figura 7.

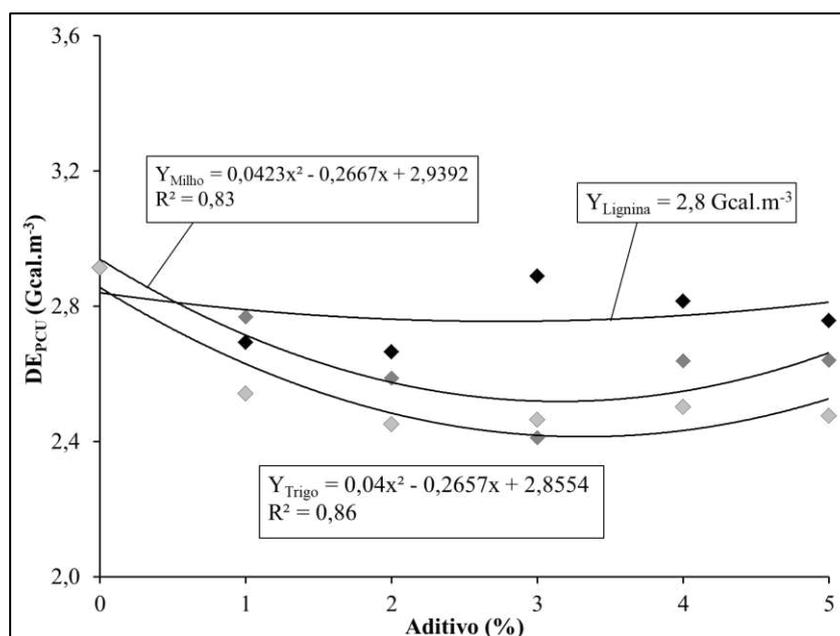


Figura 7 – Valores médios observados e estimados para a densidade energética, com base no poder calorífico útil dos *pellets* em função da porcentagem de aditivo

Os tratamentos aditivados com amido de milho e farinha de trigo apresentaram redução significativa da densidade energética até 3% de adição. A redução da densidade energética ocorreu em função do poder calorífico útil (Figura 4) e da densidade a granel (Figura 1), o que pode ser observado nos *pellets* aditivados com amido de milho e farinha de trigo nas porcentagens até 3% de adição.

Devido aos diferentes comportamentos das tendências, observa-se que todos os aditivos são diferentes entre si e tenderam a aumentar a densidade energética dos *pellets*. Os *pellets* aditivados com lignina kraft apresentam valor médio superior aos demais e isso implica diretamente no transporte e armazenamento, pois combustíveis com maior densidade energética permite otimizar o transporte, reduzindo custos e aumento da distância de transporte, além de armazenar maior quantidade de energia por longo período de tempo.

Outra propriedade que afeta diretamente o processo de combustão e a regulagem dos equipamentos de queima é a composição química imediata dos combustíveis. Os teores de cada componente permite conhecer sobre a velocidade e tempo de queima durante a combustão, onde maiores teores de materiais voláteis (TMV) apresentam maior velocidade de queima, devido os compostos voláteis oxidarem e liberar energia de forma mais rápida quando comparado à oxidação do carbono fixo presente no biocombustível (SANTOS et al. 2013).

Em relação aos compostos químicos imediatos dos *pellets*, não houve efeito significativo dos tratamentos nos teores de materiais voláteis e carbono fixo, os quais apresentaram valores médios de 86,1 e 13,75 %, respectivamente. As diferentes porcentagens estudadas e os tipos de aditivos utilizados não foram suficientes para apresentar efeito significativo da quantidade de aditivo para estas propriedades. Entretanto, os aditivos apresentaram-se significativamente diferentes (Tabela 3).

O teor de cinzas (TCz) dos *pellets* é outra propriedade de grande importância relacionada ao uso do combustível em sistemas de queima e principalmente na comercialização, tornando-se um fator decisivo na compra e possivelmente exportação desse combustível. De acordo com os resultados, não foi observado efeito significativo da quantidade de aditivo, apresentando valor médio de cinzas de 0,16%. Os teores de cinzas observados neste estudo atendem ao especificado na norma de comercialização EN 14961-2 (DIN, 2011), que estabelece valores máximos de 0,7%.

Apesar dos aditivos apresentarem diferenças significativas (Tabela 3) e a lignina kraft possuir maior teor de cinzas em relação a madeira e aos aditivos à base de amido, as quantidades adicionadas não foram suficientes para apresentar tal diferença.

Ressalta-se que elevados teores de cinzas podem reduzir o poder calorífico superior, prejudicar processos de queima, além de causar incrustações nas câmaras de combustão, corrosão de tubulações e demais equipamentos, além da gerar resíduos (NHUCHHEN et al., 2014).

5.2.4. Propriedades mecânicas dos *pellets*

As propriedades mecânicas fornecem informações importantes sobre a capacidade do material em apresentar condições de transportes, movimentações e armazenamentos por longos períodos e distâncias sem que ocorra a perda de suas propriedades.

A durabilidade mecânica dos *pellets* representa a quantidade de massa que se perde devido à quebra/fratura dos *pellets* em relação a sua massa inicial. De acordo com os resultados, observou-se interação significativa entre aditivo e porcentagem para todos os tratamentos (Figura 8).

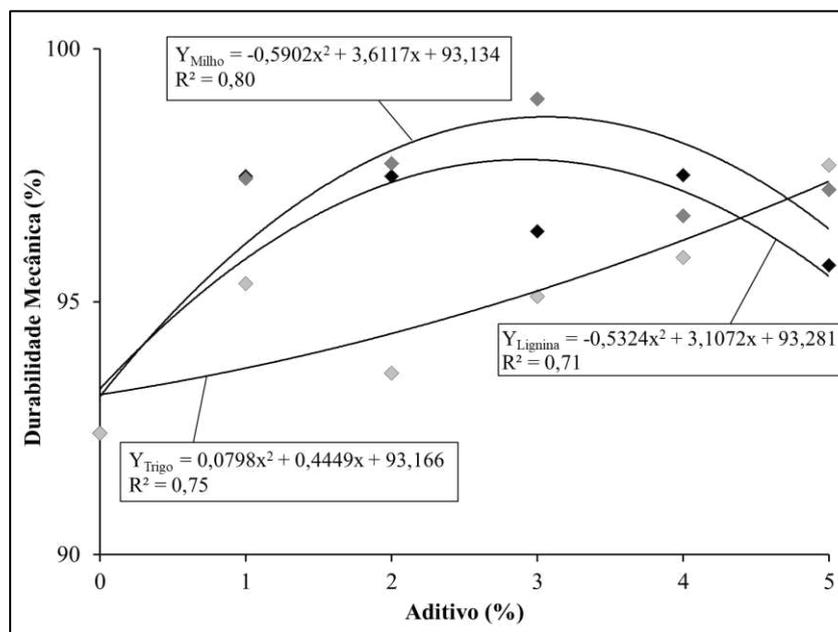


Figura 8 – Valores médios observados e estimados para durabilidade mecânica dos *pellets* em função da porcentagem de aditivo

Observa-se para os *pellets* aditivados com amido de milho e também para os produzidos com lignina kraft que adições até 3% aumentam a durabilidade mecânica. Já os *pellets* aditivados com farinha de trigo exprime tendência de aumento à medida que aumenta a quantidade adicionada à massa de partículas de madeira, apresentando-se melhor efetividade em porcentagens elevadas, sendo observado durante a peletização que, após a aplicação do vapor, ocorre à formação de grânulos e parte do amido fica retida na parede do alimentador, nos rolos de compressão e na parede da prensa peletizadora.

O amido de milho em porcentagens acima de 3% facilita o fluxo através da matriz de peletização, diminuindo o tempo de residência, gerando *pellets* com menor durabilidade mecânica. O menor tempo de residência do *pellet* na matriz implica em menor tempo sob efeito da temperatura, tornando a ação de plasticização da lignina da madeira incompleta e redução da função ligante do aditivo aplicado (WHITTAKER; SHIELD, 2017).

De modo geral, a adição de lignina *kraft* promoveu menor formação de grânulos e pouca retenção nos equipamentos de produção, sendo, portanto, a maior parte dela

utilizada para unir as partículas, formando *pellets* com textura lisa e visualmente sem fissuras. Somente nas maiores adições que se observou a formação de *pellets* com pequenas fissuras e parte da lignina aderida no sistema de peletização, principalmente no alimentador.

Entre os aditivos, diferenças significativas foram observadas devido aos diferentes comportamentos apresentados pelas tendências. Os tratamentos com 5% de amido de trigo, 2 e 3% de amido de milho e 1, 2 e 4% de lignina *kraft*, apresentaram valores médios superiores ao mínimo exigido na norma de comercialização EN 14961-2 (DIN, 2011) que exige valores superiores a 97,5%. Cabe ressaltar que esta normativa permite no máximo 2% de aditivos, dessa forma, somente os *pellets* com 2% de amido de milho e 1 e 2% de lignina *kraft* atendem à normativa.

O teor de finos representa a quantidade de perda de partículas, em massa, em relação à massa final dos *pellets*. De acordo com os resultados não houve efeito significativo da quantidade de aditivo, apresentando valor médio igual a 0,13%. Todos os tratamentos atenderam a norma de comercialização EN 14961-2 (DIN, 2011), que estabelece que os *pellets* devam ter uma geração de finos menor que 1%.

A maior resistência dos pellets, independente do tratamento, pode estar associada à temperatura da matriz durante a peletização, gerando *pellets* com melhores características de ligação entre as partículas. Além disso, os *pellets*, de forma geral, apresentaram visualmente textura lisa e sem fissuras, evidenciando a boa compactação da massa de partícula juntamente com o aditivo. Segundo Tumurulu et al. (2011) a temperatura de peletização apresenta efeito direto sobre a durabilidade dos *pellets*, o que consequentemente influencia o teor de finos gerados durante o manuseio. Para madeira de *Pinus* sp. temperaturas superiores a 90 °C é suficiente para iniciar a plasticização da lignina e resultar em melhor densificação das partículas, uma vez que a temperatura de prensagem deste estudo variou entre 105 ± 10 °C justificando o baixo teor de finos observado para os *pellets*, independente dos tratamentos.

Na Figura 9 são apresentados os valores médios de dureza dos *pellets* em função dos tratamentos.

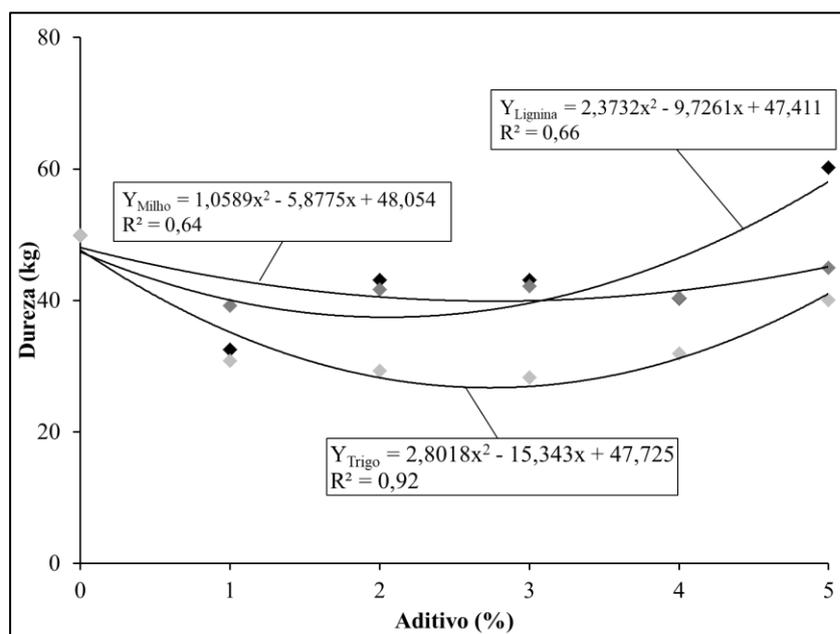


Figura 9 – Valores médios observados e estimados para dureza (kg) dos *pellets* em função da porcentagem de aditivo

Observa-se efeito significativo da interação entre o tipo de aditivo e as porcentagens utilizadas para a produção dos *pellets*. Houve redução da dureza dos *pellets* até a adição de 3%, principalmente para os tratamentos aditivados com farinha de trigo, os quais apresentaram redução mais acentuada quando comparado aos demais.

Por outro lado, adições superiores a 3% apresenta incremento desta propriedade, o que pode estar relacionado com a densidade dos *pellets*, uma vez que a densidade do *pellet* tem efeito direto sobre sua resistência (TARASOV, et al., 2013).

Entre os aditivos, observaram-se diferenças significativas devido ao comportamento das tendências, sendo que os *pellets* produzidos com lignina kraft apresentaram maior dureza em relação aos demais.

6. CONCLUSÃO

A madeira de *Pinus sp.* apresenta propriedades favoráveis para a produção de *pellets*, gerando biocombustíveis com características que adequam às exigências à normativa europeia de comercialização e parâmetros ótimos para fins energéticos.

Os aditivos contribuem de forma positiva na produção dos *pellets* e apresentam potencial para utilização na peletização, contudo, necessita-se de adaptações ao processo de alimentação, utilizando equipamentos antiaderentes, ou mudança na forma de aplicação do aditivo.

A lignina *kraft* e o amido de milho apresentam características favoráveis ao processo de peletização contribuindo significativamente para as propriedades dos *pellets*, principalmente as propriedades mecânicas, permitindo o transporte, armazenamento e manuseio por longas distâncias, reduzindo custos e mantendo a integridade do biocombustível.

Com finalidade de melhorias nas propriedades mecânicas dos *pellets*, a adição de até 4% de amido de milho e/ou lignina *kraft* apresentam os melhores resultados. Já para propriedades físicas e químicas, adições até 2% apresentam melhorias.

A normativa de comercialização utilizada para qualificar os *pellets* (EN 14961-2, 2010) permite a adição de aditivos até 2%, a adição de amido de milho e lignina *kraft* abaixo dessas porcentagens apresentam melhores resultados quando observados às propriedades físicas e mecânicas. Vale ressaltar que revisões sobre os valores exigidos pelas normativas devem ser consideradas com objetivo de reduzir a rigidez sobre os parâmetros de comercialização.

Para algumas propriedades os *pellets* aditivados apresentaram resultados inferiores à testemunha, contudo estes tratamentos apresentaram propriedades mecânicas superiores, dessa forma, deve-se avaliar se a inclusão de aditivos é economicamente viável de forma a atender às normativas de comercialização e o mercado externo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **DIN EN 14774-2: Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method.** Alemanha: CEN: 9 p. 2009.

_____. **DIN EN 14918: Determination of calorific value.** Berlim: CEN: 63 p. 2010.

_____. **DIN EN 14961-1: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements.** Alemanha: CEN: 56 p. 2010.

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

_____. **DIN EN 14961-6: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Non-Wood *pellet's* for non-industrial use.** Alemanha: CEN: 16 p. 2012.

_____. **DIN EN 15103: Solid biofuels - Determination of bulk density.** Alemanha: CEN: 14 p. 2010.

_____. **DIN EN 15104: Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods.** Berlim: CEN: 15 p. 2011.

_____. **DIN EN 15210-1: Solid biofuels - Determination of mechanical durability of *pellet's* and briquettes - Part 1: *Pellet's*.** Alemanha: CEN: 12 p. 2010.

_____. **DIN EN 15296: Conversion of analytical results from one basis to another.** Berlim: CEN: 15 p. 2011.

_____. **DIN EN 16127: Solid biofuels - Determination of length and diameter of *pellets*.** Alemanha: CEN: 11 p. 2012.

_____. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp.** Atlanta, USA. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE PELLET'S. **Produtores de *pellet's*.** Sorocaba, SP; 2014. <<http://www.abipel.com.br/Home.aspx>> Acesso em: 08 de dezembro de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: Determinação da densidade básica em madeira.** Rio de Janeiro, 6p, 2003.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: Análise química imediata do carvão vegetal.** Rio de Janeiro: 8 p, 1986.

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, 2010. 131 p.

CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; SOUZA, M. M. Produção de *Pellet's* de Madeira. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J., *et al* (Eds.). **BIOENERGIA E BIORREFINARIA: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. 1 ed. Viçosa, MG: Os Autores, 2013. cap. 14, p. 379-400.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P.; Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Revista Ciência Rural**, 2008, 10p. ISSN 0103-8478.

ELLIS, R.P.; COCHRANE, M. P.; DALE, M. F. B.; DUFFUS, C. M.; LYNN, A.; MORRISON, I. M.; PRENTICE, R. D. M.; SWANSTON, J. S.; TILLER, S. A. Starch production and industrial use (Review). **Journal of Science Food and Agriculture**, London, v.77, n. 3, p.289-311, 1998.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro, p.296. 2016.

GARCÍA, H. F.; MARTÍN, J.F.; RODRÍGUEZ, J.J.; Posibilidades de aproveitamiento de la lignina en la industria química. **Ingeniería Química**, Octubre, 249-254, 1984.

GARCIA, D. P.; *Pellet's*: Uma questão de competitividade e preço. **Revista da Madeira**, v.138, p.32-34, 2014.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V. e LUDWIG, C. H. (Eds.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. ed. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-266.

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

GOUVÊA, A.F.G.; **Produção de briquete a partir da adição da lignina kraft com resíduo da indústria moveleira**. 2012. 111 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HADDAD, Y.; BENNET, J. C.; DELENNE, J. Y.; MERMET, A.; ABECASSIS, J.; Rheological behaviour of wheat endosperm – proposal for classification based on the rheological characteristics of endosperm test samples. **Journal of cereal science**, v. 34, n.1, p.105-113, 2001.

HUANG, J.; Wood pellet global market report. **GEMCO Energy**. China. 2015. Disponível em: <<http://www.biofuelmachines.com/wood-pellet-global-market-report-2014.html>>. Acesso em: 18/01/2016.

IEA BIOENERGY; Global wood pellet industry Market and trade study. **Task 40: Sustainable International Bioenergy trade**. 190p. 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17225-2**. Solid Biofuels – Fuel Specifications and classes – Part 2: Graded wood p etes. Genebra, Su ca, 9 p. 2014.

JOHANSSON, C., **Purification of lignina fuel from kraft black liquor by diafiltration**. *Department of Chemical Engineering*, Lund University, Lund Sweden. 2013. p. 126-131.

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

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

LEBO S., GARGULAK J., MCNALLY T.; **'Lignin'**, **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**, JohnWiley & Sons, New York, NY, USA, 2001.

LI, Y.; LIU, H. High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. **Biomass Bioenergy**. p. 177-186, 2000.

LIU, Z. Edible films and coatings from starches. In: HAN, J. H. (Ed.). **Innovations in food packagings**, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, p. 318-336; 2005.

LOCKNEUS, O. **Cassava as an additive in biomass fuel pellet production**. *Thesis (Master of Science in Forestry)* – Sveriges Lantbruk Universitet. 2014. 21p.

MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F.; Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. **Ciências Agrárias**, v.31, n.1, p.137-156, 2010.

MORITA, N.; MAEDA, T.; MIYAZAKI, M.; YAMAMORI, M.; MJURA, H.; OHTSUKA, I.; Dough and baking properties of highamylose and waxy wheat flours. **Cereal Chemistry**. v.79, p.491-495, 2002.

NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A; Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, v. 2014, p. 56, 2014.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 11, 2006.

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

ÖHMAN, F.; **Precipitation and separation of lignina from kraft black liquor**. Chalmers Technical University, Gothenburg Sweden, 2008 (PhD-thesis).

OSTREICHES NORMUNGS INSTITUT. **ONORM M 7135**. Compressed wood or compressed bark in natural state - *Pellets* and briquettes, Requirements and test specifications, Vienna, 2000.

PAES, M. C. D.; **Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 6p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 75).

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **Bioresources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, B. L. C. **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico**. 2014. 74p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G.H.D.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais de biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n.66, p.113-122, 2011.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARAES JÚNIOR, M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **BioResources**, Raleigh, p.1166-1185, 2013.

QUAGLIA, G.; **Ciência y tecnología de la panificación**. Zaragoza: Acribia, 485p. 1991.

REIS, A.A.; PROTÁSIO, T.P.; MELO, I.C.N.A.; TRUGILHO, P.F.; CARNEIRO, A.C.O.; Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 2012, v.32, n.71, 277-290.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, R. V. O.; MARINHO, I. V.; TRUGILHO, P. F.; ALVES, I. C.N.; CASTRO, A. F. N. M.; Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.23, n.2, p.491-502, 2013.

SCHEUER, P. M.; FRANCISCO, A.; MIRANDA, M. Z.; LIMBERGER, V. M.; Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. v.13, n.2, p.211-222. 2011.

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, Relatório de pesquisa**. Brasília, DF: IPEA, 2012. Disponível em: <http://hbjunior19.files.wordpress.com/2012/11/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf>. Acesso em: 01/07/2015.

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.

STATSOFT, INC.; **STATISTICA (data analysis software system), version 10**. Tulsa, USA, 2011.

TABIL, L.G.; **Binding and pelleting characteristics of alfalfa**. PhD dissertação; Department of Agricultural and Bioresource Engineering. University of Saskatchewan, Canadá, p.219. 1996.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 257 cm-85: Sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: TAPPI. 1985.

TARASOV, D.; SHAHI, C.; LEITCH, M.; **Effect of additives on wood pellet physical and thermal characteristics: A review**. ISRN Forestry, 6 p., 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/876939>

THOMAS, D. J.; ATWELL, W. A.; **Starches**. Minnesota : Egan Press. 1999. 91p.

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.

TUMURULU, J. S.; Effect of process variables on the density and durability of the *pellet*'s made from high moisture corn stover. **Biosystems Engineering**, v.119, p.44-57, 2014. doi:10.1016/j.biosystemseng.2013.11.012.

VAN SOEST, J. J. G.; HULLEMAN, S. H. D.; WIT, D.; VLIEGENTHART, J. F. G. Crystallinity in starch bioplastics. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 5, n. 1, p. 11-22, 1996.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais: 21 p. 1984.

WARAJANONT, S.; SOPONPONGPIPAT, N. Effect of particle size and moisture content on cassava root *pellet* fuel's qualities follow the acceptance of *pellet* fuel standard. **International Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 2, n. 2, p. 74-79, 2013.

WEBER, F. H.; COLLARES-QUEIROZ, F. P.; CHANG, Y. K.; Caracterização físico-química, reológica, morfológica, e térmica dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29(4), p. 748-753. 2009.

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.

WILSON, T. **Factors affecting wood pellet durability**. Thesis (Magister Science in Agricultural and Biological Engineering) – Pensilvania State University. 2010. 86p.

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

8. ANEXO

Anexo A – Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas europeia e alemã

Especificação	Europa CEN CEN/TS 14961-2			Alemanha DIN Plus
	A1	A2	B	
Tamanho (mm)	$\varnothing = 6$ ou 8 L=3,15 - 40	$\varnothing = 6$ ou 8 L=3,15 - 40	$\varnothing = 6$ ou 8 L=3,15 - 40	$\varnothing = 6\pm 1$ ou 8 ± 1 L=3,15 - 40
Densidade a granel (kg/m ³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Densidade unitária (kg/m ³)	-	-	-	-
Teor de umidade (b.s., %)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Teor de Cinzas (%)	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	$\leq 3,0$	$\leq 0,7$
Poder Calorífico (MJ/kg)	16,5 a 19	16,5 a 19	16,5 a 19	$\geq 16,5$
Durabilidade Mecânica (%)	$\geq 97,5$	$\geq 97,5$	$\geq 96,5$	$\geq 97,5$
Teor de Finos (%)	≤ 1	≤ 1	≤ 1	-

Fonte: (DIN EN, 14961-2). \varnothing = diâmetro; L= comprimento.

Anexo B – Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas austríaca e sueca

Especificação	Suécia SS 18 71 20			Áustria Önorm M 7135
	G1	G2	G3	Madeira
Tamanho (mm)	$\varnothing = < 25$ L= < 4 x \varnothing	$\varnothing = < 25$ L= < 5 x \varnothing	$\varnothing = < 25$ L= < 5 x \varnothing	$\varnothing = 4 \leq D < 10$ L= $\leq 5x D$
Densidade a granel (kg/m ³)	≥ 600	≥ 500	≥ 500	-
Densidade unitária (kg/m ³)	-	-	-	≥ 1120
Teor de umidade (b.s., %)	≤ 10	≤ 10	≤ 12	≤ 10
Teor de Cinzas (%)	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 0,5$
Poder Calorífico (MJ/kg)	≥ 17	≥ 17	≥ 15	$> 18,0$
Durabilidade Mecânica (%)	-	-	-	-
Teor de Finos (%)	$\leq 0,8$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$< 2,3$

Fonte: (OSTRREICHES NORMUNGS INSTITUT, 2000). \varnothing = diâmetro; L= comprimento.

Anexo C – Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas italiana e americana

Especificação	Itália CTI – R 04/05			EUA PFI		
	A	B	C	P	S	U
Tamanho (mm)	$\varnothing = 6\pm 0,5$ ou $8\pm 0,5$ L= $\varnothing - 5x \varnothing$ ou L= $\varnothing - 4x \varnothing$			$\varnothing = 5,84 \leq D < 7,25$		
Densidade a granel (kg/m ³)	620 - 720	620 - 720	≥ 550	640 - 736		608 - 736
Densidade unitária (kg/m ³)	-	-	-	-	-	-
Teor de umidade (b.s., %)	≤ 10	≤ 10	≤ 15	≤ 8	≤ 10	≤ 10
Teor de Cinzas (%)	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	-	$\leq 1,0$	≤ 2	≤ 6
Poder Calorífico (MJ/kg)	$> 17,0$	$> 16,20$	-	-	-	-

Durabilidade Mecânica (%)	97,7	95	90	≥96,5	≥95,0	≥95,0
Teor de Finos (%)	≤ 1,0	≤ 1,0	-	≤ 0,50	≤ 1,0	≤ 1,0

Fonte: (PELLET FUELS INSTITUTE, 2011). Ø = diâmetro; L= comprimento; P= Premium; S= Standard; U= Utility.

Anexo D – Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas da Organização Internacional de Padronização

Especificação	ISO 17225 – 2					
	A1	A2	B	I1	I2	I3
Tamanho (mm)	Ø = 6±1 ou 8±1 L = 3,15 < L ≤ 40			Ø = 6±1 ou 8±1 L = 3,15 < L ≤ 40		
Densidade a granel (kg/m ³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Densidade unitária (kg/m ³)	-	-	-	-	-	-
Teor de umidade (b.s., %)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Teor de Cinzas (%)	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2	≤ 1	≤ 1,5	≤ 3
Poder Calorífico (MJ/kg)	≥16,5	≥16,5	≥16,5	≥16,5	≥16,5	≥16,5
Durabilidade Mecânica (%)	≥97,5	≥97,5	≥96,5	97,5-99	97-99	96,5-99
Teor de Finos (%)	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 4	≤ 5	≤ 6

Fonte: (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014). Ø= diâmetro; L= comprimento.

Anexo E – Informação nutricional da farinha de trigo e amido de milho

Informação Nutricional*		
	Amido de milho Porção de 17 gr (1,5 colher de sopa)	Farinha de trigo Porção de 50 gr (0,5 xícara)
Valor Energético	58 kcal = 244 kJ	180 kcal = 756 kJ
Carboidratos	10 gr	38 gr
Proteínas	1,5 gr	5,0 gr
Gorduras totais	1,3 gr	1,0 gr
Gorduras saturadas	0,5 gr	--
Gorduras <i>trans</i>	Não contém	--
Fibra alimentar	0,7 gr	1,0 gr
Sódio	796 mg	--
Cálcio	--	9,0 mg
Ferro	--	2,1 mg
Ácido Fólico	--	75,0 mcg

* Informações contidas nas embalagens dos produtos utilizados.