



**Universidade de Brasília**  
**Faculdade de Tecnologia**  
**Departamento de Engenharia Florestal**

**Produção e caracterização de *pellets* de resíduos de madeiras  
amazônicas para fins energéticos visando o mercado internacional:  
conformidade com a norma ISO 17225-2**

Isabella de Andrade Sá

Brasília, 2019

**Universidade de Brasília**  
**Faculdade de Tecnologia**  
**Departamento de Engenharia Florestal**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE *PELLETS* DE RESÍDUOS DE  
MADEIRAS AMAZÔNICAS PARA FINS ENERGÉTICOS VISANDO O  
MERCADO INTERNACIONAL: CONFORMIDADE COM A NORMA ISO  
17225-2**

Isabella de Andrade Sá

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientadora: Dra. Lucélia Alves de Macedo

Coorientador: Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale



Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Florestal

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE *PELLETS* DE MADEIRAS  
AMAZÔNICAS PARA FINS ENERGÉTICOS VISANDO O MERCADO  
INTERNACIONAL: CONFORMIDADE COM A NORMA ISO 17225-2**

Estudante: Isabella de Andrade Sá

Matrícula: 14/0144307

Orientadora: Dra. Lucélia Alves de Macedo

Menção: SS

Dra. Lucélia Alves de Macedo  
Laboratório de Produtos Florestais – LPF  
Serviço Florestal Brasileiro – SFB  
Orientador

Prof. Dr. Arnon Teixeira do Vale  
Universidade de Brasília - UnB  
Membro da Banca

Dr. Thiago Oliveira Rodrigues  
Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT  
Membro da Banca

Dezembro/2019

## Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha mãe, Neuza, que sempre esteve ao meu lado me apoiando, incentivando e que foi essencial nos momentos mais difíceis da minha jornada, permitindo que eu realizasse o meu objetivo.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus e a minha família por me apoiarem durante esta jornada, em especial a minha mãe que sempre foi me fonte de inspiração nos momentos difíceis. Agradeço aos meus orientadores, Lucélia que sempre se mostrou disponível e paciente, me ensinando e explicando, além de me despertar um novo olhar para o meio científico. Ao prof. Ailton que sempre foi fonte de inspiração e admiração profissional e que graças a sua dedicação, despertou minha vocação dentro do curso. Agradeço a todo pessoal do LPF, Gustavo, Bruno e Greg, por toda ajuda e bons momentos lá vividos.

Agradeço também aos meus amigos, de vida e curso, Lys, Greice, Josi, Andreza, em especial a Vanessa, Duda, Leo e Gabriel que fizeram total diferença na minha graduação e vida, cada momento e conversa dividido com vocês foi crucial durante a minha jornada não só acadêmica, mas também pessoal.

Agradeço a todo departamento de Engenharia Florestal da UnB, as meninas da secretária, e a todos os professores, em especial, aos professores: Ailton, Alexandre, Alba, Zé Roberto e Manuel Claudio, que foram exemplos de profissionais e que fizeram total diferença durante minha graduação.

## Resumo

A indústria florestal brasileira gera grandes quantidades de resíduos de madeira, que podem ser aproveitados para uso energético na forma de *pellets*, agregando valor à cadeia produtiva do setor. O objetivo do estudo foi avaliar a viabilidade técnica da produção de *pellets* para fins energéticos a partir de resíduos de madeiras amazônicas e analisá-los em relação à Norma ISO 17225-2. Foram estudadas 6 espécies amazônicas (*Peltogyne lecointei* – Roxinho, *Erisma uncinatum* – Libra, *Martiodendrom elatum* – Tamarindo, *Handroanthus incanus* - Ipê-roxo, *Dipteryx odorata* – Cumaru-ferro e *Allantoma decandra* - Jequitibá) oriundas da Floresta Nacional do Jacundá, Rondônia. A partir dessas espécies foram preparadas 4 misturas (M1: cumaru-ferro e jequitibá; M2: todas as espécies; M3: roxinho, tamarindo, ipê-roxo e cumaru; M4: libra e jequitibá), que foram peletizadas sob dois teores de umidade, 8 e 10%. Para avaliação do efeito do tipo de mistura e do teor de umidade delas nas propriedades dos *pellets* foi utilizado um experimento fatorial 4x2 (4 misturas e 2 teores de umidade), totalizando 8 tratamentos. Os *pellets* oriundos dos 8 tratamentos foram analisados conforme a Norma ISO 17225-2. Todas as misturas testadas mostraram-se aptas à produção de *pellets* para fins energéticos. As misturas 1, 2 e 3, nos dois teores de umidade testados, produziram *pellets* cujo diâmetro, comprimento, teor de umidade, teor de cinzas, densidade a granel e poder calorífico inferior correspondem à classe A1 (melhor classe de qualidade, segundo a Norma ISO 17225-2). Nenhum dos tratamentos testados permitiu a produção de *pellets* com durabilidade mecânica mínima de 96,5% exigida pela Norma ISO 17225-2. Os *pellets* da mistura 3, peletizada com 10% de teor de umidade, apresentaram a maior durabilidade mecânica (90,4%). O aumento do teor de umidade das misturas (de 8 para 10%) impactou positivamente a durabilidade mecânica dos *pellets* das misturas 1, 2 e 3. O processo de peletização aumentou a densidade a granel dos resíduos, em média, em 2,31 vezes e a densidade energética em 2,55 vezes.

**Palavras-chave:** Madeiras tropicais; Resíduos florestais; *Pellets*; Norma ISO 17225-2.

## Abstract

The Brazilian forest industry generates large amounts of wood waste, which can be used for energy use in the form of pellets, adding value to the sector's production chain. This study aimed to evaluate the technical feasibility of producing pellets for energy purposes from Amazonian wood residues and analyzing them in relation to ISO 17225-2. Six Amazonian species (*Peltogyne lecointei* - Roxinho, *Erismia uncinatum* - Libra, *Martiodendrom elatum* - Tamarindo, *Handroanthus incanus* - Ipê-roxo, *Dipteryx odorata* - Cumaru-ferro and *Allantoma decandra* - Jequitibá) from Jacundá National Forest, Rondônia, were studied. From these species were prepared 4 blends (M1: cumaru-ferro and jequitibá; M2: all species; M3: roxinho, tamarindo, ipe-roxo and cumaru; M4: libra and jequitibá), which were pelleted under two moisture levels, 8 and 10%. To evaluate the effect of blend type and their moisture content on the properties of the pellets, a 4x2 factorial experiment (4 blends and 2 moisture contents) was used, totaling 8 treatments. The pellets from the 8 treatments were analyzed according to ISO 17225-2. All blends tested were able to produce pellets for energy purposes. Blends 1, 2 and 3, at the two moisture levels tested, produced pellets whose diameter, length, moisture content, ash content, bulk density and lower calorific value correspond to class A1 (best quality class according to International Standard ISO 17225-2). None of the treatments tested allowed the production of pellets with a minimum mechanical durability of 96.5% required by ISO 17225-2. Blend 3, pelleted with 10% moisture content, had the highest mechanical durability (90.4%). Mechanical durability of the blends 1, 2 and 3 increased with increasing moisture content of the blends (from 8 to 10%). The pelletizing process increased the bulk density of the waste by a factor of 2,31 and the energy density by a factor of 2,55.

**Keywords:** Tropical woods; Forest residues; *Pellets*; ISO 17225-2 standard.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	2
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	RESÍDUOS FLORESTAIS.....	3
3.2	<i>PELLETS</i> DE MADEIRA.....	3
3.3	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i> .....	4
3.4	NORMAS DE QUALIDADE DE <i>PELLETS</i> DE BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS.....	6
3.5	PRODUÇÃO BRASILEIRA DE <i>PELLETS</i> .....	8
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
4.1	LOCAL DE REALIZAÇÃO DO PROJETO.....	9
4.2	ESPÉCIES DE MADEIRAS ESTUDADAS.....	9
4.3	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ESPÉCIES SELECIONADAS PARA ESTUDO.....	9
4.3.1	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.....	10
4.3.2	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS.....	10
4.3.3	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE A GRANEL.....	11
4.3.4	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR.....	11
4.3.5	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE ENERGÉTICA.....	12
4.4	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA PELETIZAÇÃO.....	12
4.5	PELETIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	14
4.6	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS <i>PELLETS</i> .....	14
4.6.1	DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO E COMPRIMENTO DOS <i>PELLETS</i> .....	15
4.6.2	DETERMINAÇÃO DA DURABILIDADE MECÂNICA DOS <i>PELLETS</i> .....	15
4.6.3	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FINOS DOS <i>PELLETS</i> (PARTÍCULAS < 3,15MM).....	16
4.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	16
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
5.1	PROPRIEDADES DAS MATÉRIAS PRIMAS ESTUDADAS.....	17
5.2	ANÁLISE DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS.....	19
5.2.1	DIÂMETRO E COMPRIMENTO DOS <i>PELLETS</i> .....	21
5.2.2	TEOR DE UMIDADE DOS <i>PELLETS</i> .....	23
5.2.3	TEOR DE CINZAS DOS <i>PELLETS</i> .....	25
5.2.4	DURABILIDADE MECÂNICA E TEOR DE FINOS DOS <i>PELLETS</i> .....	26
5.2.5	DENSIDADE A GRANEL DOS <i>PELLETS</i> .....	30
5.2.6	PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS <i>PELLETS</i> .....	31
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE MATÉRIA-PRIMA E <i>PELLETS</i> : PCI, DENSIDADE A GRANEL E DENSIDADE ENERGÉTICA.....	33
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	35
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Especificações de qualidade de <i>pellets</i> de madeira para usos residencial e comercial, de acordo com a Norma ISO 17225-2. ....	7
Tabela 2. Especificações e classes de qualidade de <i>pellets</i> de madeira para uso industrial, de acordo com a Norma ISO 17225-2. ....	7
Tabela 3. Relação das espécies de madeira utilizadas no estudo. ....	9
Tabela 4. Critérios utilizados para preparação das misturas a serem peletizadas. ....	13
Tabela 5. Tratamentos utilizados na produção dos <i>pellets</i> . ....	14
Tabela 6. Normas técnicas para determinação das propriedades dos <i>pellets</i> . ....	15
Tabela 7. Teores de umidade e cinzas, densidade a granel e PCI das espécies estudadas. ....	17
Tabela 8. Teores de umidade e cinzas, densidade a granel e PCI das misturas de espécies estudadas. ....	17
Tabela 9. Resumo da análise de variância para o diâmetro dos <i>pellets</i> . ....	21
Tabela 10. Valores médios para o diâmetro dos <i>pellets</i> produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade. ....	21
Tabela 11. Resumo da análise de variância para o comprimento dos <i>pellets</i> . ....	22
Tabela 12. Valores médios para o comprimento dos <i>pellets</i> produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade. ....	22
Tabela 13. Resumo da análise de variância para o teor de umidade dos <i>pellets</i> . ....	24
Tabela 14. Valores médios para o teor de umidade dos <i>pellets</i> produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade. ....	24
Tabela 15. Resumo da análise de variância para o teor de cinzas dos <i>pellets</i> . ....	25
Tabela 16. Valores médios para o teor de cinzas dos <i>pellets</i> produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade. ....	25
Tabela 17. Resumo da análise de variância para a durabilidade mecânica dos <i>pellets</i> . ....	26
Tabela 18. Valores médios para a durabilidade mecânica dos <i>pellets</i> produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade. ....	27
Tabela 19. Valores médios para o teor de finos dos <i>pellets</i> produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade. ....	29
Tabela 20. Resumo da análise de variância para a densidade a granel dos <i>pellets</i> . ....	30
Tabela 21. Valores médios para a densidade a granel dos <i>pellets</i> produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade. ....	31
Tabela 22. Resumo da análise de variância para o poder calorífico inferior dos <i>pellets</i> . ....	32
Tabela 23. Valores médios para o PCI dos <i>pellets</i> produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade. ....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz peletizadora laboratorial.....	5
Figura 2 – Etapas da produção industrial de pellets. Fonte: COUTO et al. (2004). .....	5
Figura 3 – Madeiras selecionadas para estudo após trituração em moinho de martelos. ....	10
Figura 4 – Misturas de resíduos de espécies amazônicas para ensaios de peletização .....	13
Figura 5 – Peletizadora laboratorial utilizada na produção dos pellets.....	14
Figura 6 – Pellets produzidos a partir das diferentes misturas de espécies amazônicas. ....	20
Figura 7 – PCI das misturas antes e depois da peletização. Bu: base úmida. ....	33
Figura 8 – Densidade a granel das misturas antes e depois da peletização. Bu: base úmida.....	33
Figura 9 – Densidade energética das misturas antes e depois da peletização. Bu: base úmida. ....	34

# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de madeira tropical (ITTO, 2016) e a Amazônia é a principal região fornecedora do País (SFB e IPAM, 2011). A destinação de florestas públicas como florestas de produção por meio de concessões florestais vem se mostrando um caminho mais rápido para associar fontes legais de recursos madeireiros com conservação (SFB e IPAM, 2011).

A atividade florestal, no entanto, gera resíduos durante a colheita e processamento da madeira, os quais podem se tornar passivos ambientais. O aproveitamento desses resíduos é incentivado pelas exigências ambientais vigentes, como a Lei nº 12.305/10, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), assim como pela necessidade de agregação de valor à cadeia produtiva da madeira, que implica na transformação dos resíduos em subprodutos com valor agregado (SOUZA, 2008).

Uma das alternativas de aproveitamento dos resíduos gerados durante o processamento industrial da madeira é a sua compactação na forma de *pellets* para posterior utilização energética.

O *pellet* é um biocombustível sólido granulado, resultado da compactação de resíduos vegetais, utilizado na geração de energia térmica e elétrica. As vantagens do *pellet* em relação ao resíduo *in natura* incluem maior densidade energética, menor teor de umidade, tamanho e propriedades uniformes, boa resistência mecânica, o que facilita o transporte, armazenamento e manuseio do combustível (BHATTACHARYA *et al.*, 1989).

O consumo de *pellets* em substituição aos combustíveis fósseis foi incentivado pela necessidade de vários países de reduzirem a emissão de gases de efeito estufa (CUPERTINO, 2017). A produção de *pellets* na União Europeia foi de 15,3 milhões de toneladas em 2017, seguida pela produção norte americana, que atingiu cerca de 8 milhões de toneladas no mesmo ano (AEBIOM 2018). No Brasil, apesar da grande disponibilidade de resíduos provenientes de florestas nativas e plantadas com potencial para impulsionar o mercado de *pellets*, a produção e o consumo deste biocombustível ainda são incipientes. Em 2017, a produção brasileira de *pellets* foi de apenas 470 mil toneladas, das quais apenas 80 mil possuíam certificação *ENPlus*<sup>1</sup>, sendo habilitados para exportação para a União Europeia.

---

<sup>1</sup> Certificação cujos requisitos estão amplamente baseados na norma ISO 17225, mas ultrapassam-na em alguns parâmetros específicos.

Embora a produção brasileira de *pellets* seja oriunda de florestas plantadas, a região amazônica tem potencial para ser uma importante fonte de resíduos para a produção desse biocombustível. No entanto, o aproveitamento de resíduos da região amazônica enfrenta dificuldades logísticas, de transporte, além de desafios técnicos ligados ao processo de peletização e à qualidade dos *pellets* produzidos.

Em relação às propriedades dos *pellets* de madeiras amazônicas, o teor de cinzas, por vezes, superior ao estabelecido por normas internacionais, é apontado como fator limitante para aplicações residenciais (GARCIA *et al.*, 2018a), uma vez que está diretamente relacionado à emissão de partículas durante a queima e à redução do poder calorífico. Em usos industriais, além dessas desvantagens, o teor de cinzas pode implicar em constantes operações de remoção de incrustações oriundas da fusão de cinzas durante a combustão.

A durabilidade mecânica e o teor de finos são igualmente propriedades importantes para obtenção da certificação para exportação de *pellets*. Essas propriedades indicam a capacidade dos *pellets* de resistirem à desintegração física durante o transporte, armazenamento e manuseio (TUMULURU, 2014). Além disso, uma alta resistência mecânica, com conseqüente redução da fração de finos (poeira e partículas finas), minimiza riscos de explosões nos compartimentos de carga durante o transporte e armazenamento (GARCIA *et al.*, 2018a).

Neste contexto, o presente estudo buscou avaliar o desempenho técnico de *pellets* produzidos a partir de resíduos de madeiras amazônicas em relação ao padrão de qualidade exigido pela Norma ISO 17225-2, que determina as classes de qualidade e especificações de *pellets* de madeira para usos industriais e não industriais.

## 2 OBJETIVO

Avaliar o desempenho técnico de *pellets* de resíduos de madeiras amazônicas em relação à norma ISO 17225-2.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir *pellets* utilizando amostras compostas de diferentes espécies visando se aproximar da condição real dos resíduos em serrarias, onde estes encontram-se misturados;
- Avaliar o efeito de quatro diferentes misturas de espécies, visto que a maior parte dos resíduos em campo se encontram misturados, e dois teores de umidade nas propriedades físicas e mecânicas dos *pellets*;

- Avaliar a qualidade dos *pellets* produzidos em relação às classes previstas na norma ISO 17225-2;
- Comparar propriedades energéticas entre resíduos *in natura* e transformados em *pellets*.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 RESÍDUOS FLORESTAIS

Resíduo florestal é todo material resultante da colheita ou desdobro que é passível de aproveitamento e não é feito, seja por limitações técnicas ou de mercado. Apesar de a indústria madeireira ter buscado utilizar aparelhos mais eficientes e capacitar sua mão de obra, estima-se que do volume total de uma tora, seja aproveitado cerca de 40% a 60% (GOMES & SAMPAIO, 2004).

Um estudo conduzido pelo Serviço Florestal Brasileiro apontou a geração de cerca de 8 milhões de metros cúbicos de resíduos do processamento da madeira em 2009 (SFB e AMAZON, 2010). Em torno de 20% desses resíduos foram destinados à produção de carvão, 32% na geração de energia e 24% em usos diversos. Os 24% restantes, cerca de 2 milhões de metros cúbicos, foram queimados ou abandonados como entulho. Além de representarem perdas na cadeia produtiva, os resíduos florestais constituem um passivo ambiental, uma vez que causam assoreamento e poluição de rios, além da poluição do ar devido à queima para eliminação dos mesmos (BRAND *et al.* 2002).

Com a crescente preocupação com o uso excessivo de combustíveis fósseis e os problemas ambientais que eles acarretam, o aproveitamento dos resíduos florestais para fins energéticos é uma opção de energia renovável, além de representar uma alternativa de agregação de valor à cadeia produtiva da madeira.

#### 3.2 PELLETS DE MADEIRA

O *pellet* é um biocombustível sólido granulado, compactado e denso, com baixo teor de umidade, permitindo elevada eficiência na combustão (GARCIA, *et al.*, 2013). Segundo GARCIA *et al.* (2013), sua principal aplicação é no aquecimento comercial ou residencial de ambientes, mas também é utilizado como combustível para a geração de energia elétrica em plantas industriais ou em usinas termoeletricas.

A compactação na forma de *pellets* reduz o teor de umidade e aumenta as densidades a granel e energética dos resíduos, diminuindo os custos com transporte e armazenamento da biomassa.

### 3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE *PELLETS*

O processo de fabricação de *pellets* consiste, principalmente, nas seguintes etapas: moagem e classificação granulométrica da matéria-prima, secagem, compactação, resfriamento, peneiramento e embalagem/armazenamento (GIACOMO & TAGLIERI, 2009).

A produção de *pellets* de madeira sofre influência de diversos fatores, tais como: teor de umidade, densidade e distribuição de tamanho das partículas da matéria prima, e parâmetros de peletização, como tempo de prensagem, temperatura e pressão (JACINTO, 2017). A lignina atua como aglutinante durante a peletização, fluindo entre as partículas e preenchendo as fissuras e espaços vazios (STELTE, *et al.*, 2011a; STELTE, *et al.* 2011b; FERREIRA, 2017). Para tal, durante o processo de peletização a lignina passa pelo processo de transição vítrea, passando de um estado desordenado rígido, para um estado desordenado maior, no qual as cadeias poliméricas possuem uma maior mobilidade, resultando em um comportamento menos rígido. A transição vítrea da lignina está ligada à temperatura, ao teor de umidade, ao peso molecular do polímero, à natureza do material, se ele está em sua forma isolada ou incorporado à madeira, na forma cristalina ou amorfa (FIGUEROA & MORAES, 2009).

Antes da produção de *pellets*, a matéria prima é seca ao sol e/ou em estufa. O tamanho das partículas tem influência direta na qualidade do *pellet*, pois interfere na compactação e na porosidade do produto, sendo preferencialmente utilizadas partículas menores que 3,0 mm. O teor de umidade ideal para peletização varia em função da espécie, oscilando entre 6 e 13% para madeiras, 8 a 15% para palhas, podendo chegar a valores entre 20 e 25% para gramíneas como o *miscanthus* (WHITTAKER & SHIELD, 2017).

Com exceção do processo de secagem, o maior consumo de energia na produção de *pellets* está relacionado à moagem da matéria-prima antes da secagem, bem como ao processo de densificação das partículas de madeira durante a peletização (ŚWINIGÓN & LONGAUER, 2005).

De modo geral, os processos de densificação de biomassa consistem na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem a adição de ligantes ou tratamento térmico. Na peletização é utilizada uma matriz de aço perfurada com um denso arranjo de orifícios, cujos diâmetros podem variar de 6 a 12mm. A matriz gira e a pressão interna dos cilindros forçam a passagem da biomassa através dos orifícios (Figura 1). O *pellet* formado é cortado por facas ajustadas ao comprimento desejado (MIGLIORINI, 1980).

De forma genérica a produção industrial de *pellets* pode ser representada pelo esquema da Figura 2.



Figura 1 – Matriz peletizadora laboratorial.

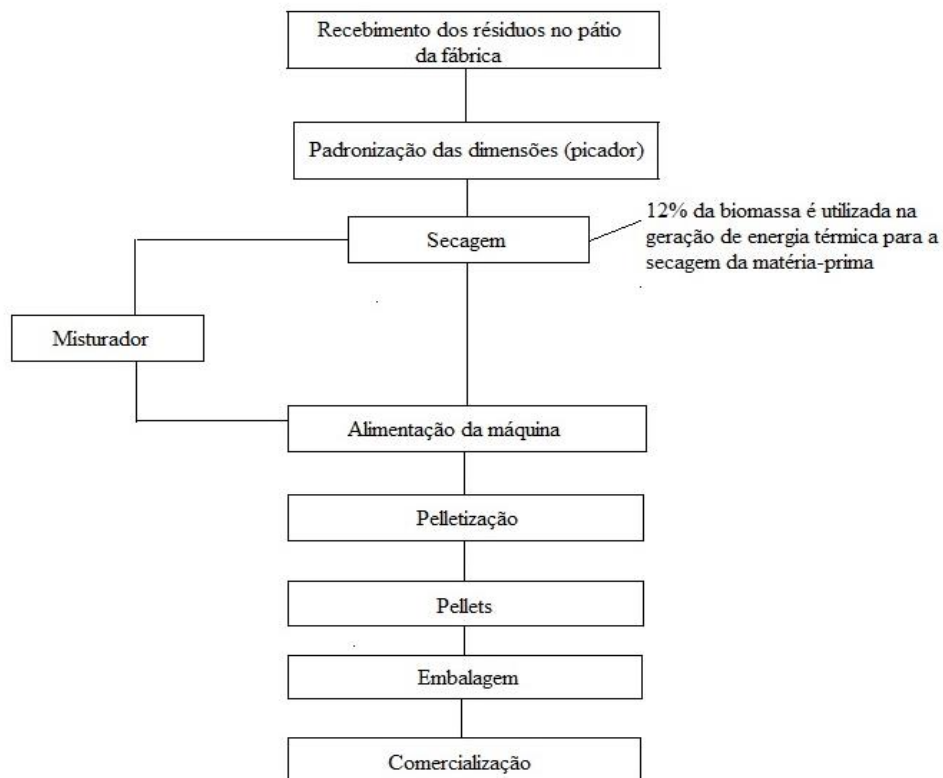


Figura 2 – Etapas da produção industrial de *pellets*. Fonte: COUTO *et al.* (2004).

### 3.4 NORMAS DE QUALIDADE DE *PELLETS* DE BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS

A compactação de resíduos por meio da peletização é um importante instrumento de viabilização do uso da biomassa residual para energia, na medida em que disponibiliza um combustível com maior densidade energética, baixo teor de umidade, tamanho e qualidade uniformes, boa resistência mecânica e, portanto, de fácil manuseio, transporte e armazenamento (BHATTACHARYA *et al.*, 1989).

Apesar de já ser uma tecnologia mundialmente conhecida, a inserção da peletização no Brasil ainda é incipiente. Existem lacunas técnicas, econômicas e regulatórias, principalmente em relação à peletização de espécies florestais amazônicas. Diferentemente de diversos países europeus, o Brasil ainda não possui normas que regulamentem a qualidade dos *pellets* de biomassa.

Seja para uso residencial, comercial ou industrial, os *pellets* de biomassa devem atender a diversos critérios de qualidade que impactarão diretamente a qualidade da combustão e as emissões de gases durante a queima. A padronização das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos *pellets* é indispensável para a emissão de laudos de qualidade, muitas vezes requeridos pelos próprios consumidores e crucial para viabilizar o mercado internacional do produto (SPANHOL *et al.* 2015). Visando unificar a certificação de *pellets* no mercado europeu, foi lançado em 2014 um conjunto de normas internacionais (ISO 17225, partes 1 a 8) estabelecendo padrões de qualidade para *pellets* e briquetes oriundos de biomassa vegetal para uso residencial e industrial (GARCIA *et al.* 2018a).

A norma ISO 17225-2 estabelece diferentes classes de qualidade para *pellets* de madeira: A1, A2 e B para usos residencial e comercial (serviços) e I1, I2 e I3 para uso industrial. Os parâmetros considerados nessa classificação são: diâmetro, comprimento, teor de umidade, teor de cinzas, durabilidade mecânica, teor de finos, poder calorífico inferior, densidade a granel, teor de nitrogênio, enxofre, cloro, arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel e zinco. Os valores exigidos para cada uma dessas propriedades em função do uso final (residencial, comercial e industrial) são mostrados nas Tabelas 1 e 2.



Tabela 1. Especificações de qualidade de *pellets* de madeira para usos residencial e comercial, de acordo com a Norma ISO 17225-2.

Propriedade	Unidade	A1	A2	B
Diâmetro	mm	6,0 ±1 ou 8,0 ±1	6,0 ±1 ou 8,0 ±1	6,0 ±1 ou 8,0 ±1
Comprimento	mm	3,15- 40	3,15- 40	3,15- 40
Teor de Umidade	% base úmida	≤10	≤10	≤10
Teor de Cinzas	% base seca	≤0,7	≤1,2	≤2,0
Durabilidade	% base úmida	≥97,5	≥97,5	≥96,5
Mecânica				
Teor de finos	% base úmida	≤1,0	≤1,0	≤1,0
Densidade Granel	Kg/m <sup>3</sup> base úmida	≥600	≥600	≥600
PCI	MJ/kg, base úmida	≥16,5	≥16,5	≥16,5
Nitrogênio	% base seca	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
Enxofre	% base seca	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,05
Cloro	% base seca	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,03
Arsênio	mg/kg base seca	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cádmio	mg/kg base seca	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Cromo	mg/kg base seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cobre	mg/kg base seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Chumbo	mg/kg base seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Mercúrio	mg/kg base seca	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Níquel	mg/kg base seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zinco	mg/kg base seca	≤ 100	≤ 100	≤ 100

Tabela 2. Especificações e classes de qualidade de *pellets* de madeira para uso industrial, de acordo com a Norma ISO 17225-2.

Propriedade	Unidade	I1	I2	I3
Diâmetro	mm	6,0 ±1 ou 8,0 ±1	6,0 ±1, 8,0±1 ou 10±1	6,0 ±1, 8,0±1, 10±1 ou 12±1
Comprimento	mm	3,15- 40	3,15- 40	3,15- 40
Teor de Umidade	% base úmida	≤10	≤10	≤10
Teor de Cinzas	% base seca	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Durabilidade	% base úmida	97,5≤DU≤99,0	97,0≤DU≤99,0	96,5≤DU≤99,0
Mecânica (DU)				
Teor de finos	% base úmida	≤4,0	≤5,0	≤6,0
Densidade Granel	Kg/m <sup>3</sup> base úmida	≥600	≥600	≥600
PCI	MJ/kg, base úmida	≥16,5	≥16,5	≥16,5
Nitrogênio	% base seca	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,6
Enxofre	% base seca	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05
Cloro	% base seca	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,1
Arsênio	mg/kg base seca	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Cádmio	mg/kg base seca	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cromo	mg/kg base seca	≤ 15	≤ 15	≤ 15
Cobre	mg/kg base seca	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Chumbo	mg/kg base seca	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Mercúrio	mg/kg base seca	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Zinco	mg/kg base seca	≤ 200	≤ 200	≤ 200

### 3.5 PRODUÇÃO BRASILEIRA DE PELLETS

O estudo conduzido por GARCIA *et al.* (2018b) apontou que a produção brasileira de *pellets* aumentou 3,47 vezes entre 2016 e 2017, totalizando cerca de 470 mil toneladas. Deste total, 53,11% eram produzidos com resíduos *Pinus sp.*, 45,75% com acácia negra e o restante era fabricado a partir de bagaço de cana-de-açúcar e casca de café. De acordo com esses autores, o crescimento acentuado da produção é justificado pelo maior volume de *pellets* de madeira destinados à exportação.

Em 2017, cerca de 66% da produção brasileira de *pellets* foi destinada ao mercado externo, principalmente Reino Unido e Itália (GARCIA *et al.*, 2018b). Apesar do crescimento expressivo, a produção de 470 mil toneladas em 2017 representava apenas 56% da capacidade instalada (AEBIOM, 2018). De acordo com o estudo conduzido pela AEBIOM (2018), essa produção é oriunda de 16 plantas instaladas no sudeste e sul do Brasil, das quais sete possuem a certificação *EnPlus*, atendendo, portanto, aos critérios mais rígidos de qualidade exigidos para uso residencial e comercial (classes A1, A2 e B).

As metas de substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis na matriz energética europeia aumentaram consideravelmente a demanda por *pellets* e o Brasil tem sido apontado como um potencial exportador desse biocombustível. Além disso, o cumprimento das metas de redução das emissões de gases de efeito estufa da indústria brasileira de cimento estabelecidas em 2019 exigirá a substituição gradual do coque de petróleo por combustíveis alternativos, o que poderá impulsionar a demanda por *pellets* de madeira e outras biomassas.

Neste sentido, é esperado que o Brasil aumente sua participação no mercado de *pellets* nos próximos anos. No entanto, para atingir esse objetivo, a indústria brasileira de *pellets* precisa vencer diversos obstáculos que incluem baixa demanda interna pelo produto, falta de competitividade nas exportações devido ao alto preço da energia elétrica brasileira, baixa escala de produção e logística deficitária (CUPERTINO, 2017).

Da mesma maneira, RENDEIRO & NOGUEIRA (2008) ressaltam que a viabilidade econômica da produção de *pellets* está relacionada com a disponibilidade, qualidade da matéria-prima, distâncias de transporte, tarifas de energia elétrica e, principalmente, a capacidade instalada da fábrica.

GENTIL (2008) destaca que são necessários subsídios governamentais para impulsionar a indústria de compactados no Brasil, como por exemplo: criação de uma legislação que incentive o

uso da biomassa em substituição aos combustíveis fósseis; desenvolvimento de normas brasileiras de qualidade de compactados; incentivos fiscais para que as indústrias possam competir com mercados organizados que utilizam combustíveis de origem fóssil, além da criação de laboratórios nacionais e/ou realização de convênios com instituições internacionais de modo a reduzir os custos com análise e certificação dos *pellets* produzidos.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO PROJETO

O estudo foi realizado na Área de Energia da Biomassa do Laboratório de Produtos Florestais – LPF do Serviço Florestal Brasileiro – SFB, em Brasília/DF.

### 4.2 ESPÉCIES DE MADEIRAS ESTUDADAS

Foram utilizadas as espécies de madeira listadas na Tabela 3, provenientes de uma concessão florestal na Floresta Nacional de Jacundá (Rondônia), anteriormente coletadas para um projeto de caracterização tecnológica do LPF.

Tabela 3. Relação das espécies de madeira utilizadas no estudo.

Nome Científico	Nome comum	Família
<i>Peltogyne lecointei</i> Ducke	Roxinho	<i>Fabaceae</i>
<i>Erismia uncinatum</i> Warm.	Libra	<i>Vochysiaceae</i>
<i>Martiodendron elatum</i> (Ducke) Gleason	Tamarindo	<i>Fabaceae</i>
<i>Handroanthus incanus</i> (A.H.Gentry) S.Grose	Ipê-roxo	<i>Bignoniaceae</i>
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	Cumarú ferro	<i>Fabaceae</i>
<i>Allantoma decandra</i> (Ducke) S.A. Mori et al.	Jequitibá	<i>Lecythidaceae</i>

### 4.3 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ESPÉCIES SELECIONADAS PARA ESTUDO

As espécies listadas na tabela 3, inicialmente na forma de caibros, foram transformadas em cavacos na carpintaria do LPF, os quais foram posteriormente triturados em um moinho de martelos. As madeiras selecionadas para estudo após trituração são mostradas na Figura 3.

A classificação granulométrica do material triturado foi feita com o auxílio de um agitador mecânico, utilizando-se uma peneira com abertura de malha de 3,36 mm. As partículas com tamanho inferior a 3,36 mm foram utilizadas para a preparação das misturas de espécies a serem peletizadas.



Figura 3 – Madeiras selecionadas para estudo após trituração em moinho de martelos.

As espécies listadas na Tabela 3 foram analisadas quanto ao teor de umidade (norma ISO 18134-1), teor de cinzas (norma ISO 18122), densidade a granel (norma ISO 17828) e poder calorífico superior (NBR 8633/84 adaptada pelo LPF) e inferior.

#### 4.3.1 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi determinado de acordo com a norma ISO 18134-1. O procedimento consiste em pesar cerca de 300 g do material e secá-lo em estufa a 103°C até massa constante. O ensaio foi realizado em triplicata. O teor de umidade é calculado conforme equação 1, sendo expresso em base úmida.

$$TU (\%) = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \text{ Eq. (1)}$$

Onde:

TU (%) é o teor de umidade em porcentagem, em base úmida

m1 é a massa da bandeja vazia, em gramas;

m2 é a massa da bandeja + amostra antes da secagem, em gramas;

m3 a massa da bandeja + amostra após a secagem, em gramas.

#### 4.3.2 Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ISO 18122, com auxílio de um macro analisador termogravimétrico (macro TGA). O princípio da norma consiste em aquecer uma amostra de biomassa de no mínimo 1g, com granulometria inferior a 1mm, até 250°C, mantê-la

durante 1 hora nesta temperatura e posteriormente aquecê-la até 550°C até massa constante. O ensaio foi realizado em duplicata. O cálculo do teor de cinzas foi feito segundo a Equação 2.

$$CZ(\%) = \frac{(m_{cad.+cz} - m_{cad.})}{m_{amos.}} * 100 \text{ Eq. (2):}$$

Onde:

CZ (%): é o teor de cinzas em porcentagem, base seca;

M cad.+cz é a massa do cadinho mais as cinzas da amostra, em gramas;

M cad.: é a massa do cadinho, em gramas;

M amos.: é a massa seca da amostra antes do ensaio, em gramas.

#### 4.3.3 Determinação da densidade a granel

A densidade a granel foi determinada de acordo com a norma ISO 17828. O princípio da norma consiste na utilização de um recipiente de volume conhecido, o qual deve ser pesado previamente e depois preenchido com a amostra do combustível a ser analisado. Após o preenchimento do recipiente, este é lançado de uma altura de cerca de 10 cm por três vezes para melhor acomodação das partículas. Em seguida, o recipiente era completado com biomassa até a borda para posterior medição da massa. O ensaio foi realizado em triplicata. A densidade a granel foi determinada segundo a Equação 3.

$$D = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \text{ Eq. (3)}$$

Onde:

D: densidade a granel em kg/m<sup>3</sup>, base úmida;

M<sub>2</sub>: massa do recipiente cheio, em kg;

M<sub>1</sub>: massa do recipiente vazio, em kg;

V: volume do recipiente, em m<sup>3</sup>.

#### 4.3.4 Determinação do poder calorífico superior e inferior

A determinação do poder calorífico superior (PCS) foi feita de acordo com procedimento LPF baseado na norma NBR 8633/84. Antes de cada ensaio, cerca de 1g de amostra com granulometria inferior a 1 mm foi peletizada a frio e seca em estufa a 103°C até massa constante. O PCS do material seco, de massa conhecida, era obtido pela queima do *pellet* em um calorímetro isoperibol automático modelo Parr 6400, utilizando-se oxigênio com grau de pureza mínimo de

99,5%. O poder calorífico inferior (PCI) foi calculado a partir do PCS, utilizando-se o teor de umidade presente no material (base úmida) e o teor de hidrogênio estimado em 6% (base seca). O cálculo do PCI foi feito com base na Equação 4 (VAN LOO & KOPPEJAN, 2012).

$$PCI = PCS * \left(1 - \frac{TU}{100}\right) - 2,447 * \frac{TU}{100} - 2,447 * \frac{TH}{100} * 9,01 * \left(1 - \frac{TU}{100}\right) \text{ Eq. (4)}$$

Onde:

PCI: poder calorífico inferior em MJ/kg, base úmida;

PCS: poder calorífico superior em MJ/kg, base seca;

TU: teor de umidade em %, base úmida;

TH: teor de hidrogênio em %, base seca.

#### 4.3.5 Determinação da densidade energética

A determinação da densidade energética não é exigida pela Norma ISO 17225-2, mas foi calculada por ser uma propriedade que influencia no custo de transporte dos *pellets*, visto que traduz a quantidade de energia que é transportada por unidade de volume. A densidade energética foi calculada de acordo com a Equação 5.

$$DE = \frac{DG \times PCI}{1000} \text{ Eq. (5)}$$

Onde:

DE: densidade energética em GJ/m<sup>3</sup>, base úmida;

DG: densidade a granel, em kg/m<sup>3</sup>, base úmida;

PCI: poder calorífico inferior, em MJ/kg, base úmida.

#### 4.4 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA PELETIZAÇÃO

A partir das seis espécies amazônicas listadas na Tabela 3, foram preparadas quatro diferentes misturas (Figura 4) para os ensaios de peletização. Os critérios utilizados para composição das diferentes misturas são descritos na Tabela 4.



Figura 4 – Misturas de resíduos de espécies amazônicas para ensaios de peletização

Tabela 4. Critérios utilizados para preparação das misturas a serem peletizadas.

Mistura de espécies	Percentual de cada espécie	Critério utilizado
<b>Mistura 1:</b> Cumaru ferro e Jequitibá	50%	As duas espécies mais exploradas na Flona Jacundá entre as espécies coletadas.
<b>Mistura 2:</b> todas as espécies listadas na tabela 3	~16.7%	Simulação da condição mais realista de resíduos em uma serraria, onde estes encontram-se misturados.
<b>Mistura 3:</b> Roxinho, Tamarindo, Ipê-roxo e Cumaru ferro	25%	Espécies com teor de cinzas < 0,7% (limite exigido para <i>pellets</i> com classe de qualidade A1, segundo a Norma ISO 17225-2).
<b>Mistura 4:</b> Libra e Jequitibá	50%	Espécies com teor de cinzas entre 0,7 e 1,2% (intervalo aceitável para <i>pellets</i> com classe de qualidade A2, segundo a Norma ISO 17225-2)

As misturas listadas na tabela 4 foram analisadas quanto ao teor de umidade (norma ISO 18134-1), teor de cinzas (norma ISO 18122), densidade a granel (norma ISO 17828), poder calorífico superior (NBR 8633/84 adaptada pelo LPF) e inferior e densidade energética utilizando os mesmos procedimentos descritos nos itens 4.3.1 a 4.3.5.

Para cada mistura foram preparados cerca de 4kg com teor de umidade ajustado para 8% e 4kg ajustados para 10% (base úmida). A preparação das amostras resultou, portanto, em oito tratamentos distintos, listados na tabela 5.

Tabela 5. Tratamentos utilizados na produção dos *pellets*.

	Teor de umidade de 8% (TU8)	Teor de umidade de 10% (TU10)
Mistura 1 (M1)	M1TU8	M1TU10
Mistura 2 (M2)	M2TU8	M2TU10
Mistura 3 (M3)	M3TU8	M3TU10
Mistura 4 (M4)	M4TU8	M4TU10

#### 4.5 PELETIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras listadas na tabela 5 foram individualmente peletizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade de Brasília utilizando-se uma peletizadora laboratorial da marca Eng-Maq, modelo 0200V, potência de 7,5 CV, matriz plana com orifícios de 6 mm de diâmetro e capacidade para produção de 110 kg/h (Figura 5). O equipamento utilizado não permite a seleção de diferentes pressões e temperaturas de trabalho. A velocidade de alimentação do equipamento pode ser ajustada numa escala de 0 a 100% e foi mantida em 45% ( $\pm 2\%$ ) para todos os ensaios. Após a peletização, os *pellets* foram deixados à temperatura ambiente até completo resfriamento para posterior armazenamento em sacos plásticos.

Figura 5 – Peletizadora laboratorial utilizada na produção dos *pellets*.

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS PELLETS

As propriedades dos *pellets* foram analisadas de acordo com as normas listadas na Tabela 6.



Tabela 6. Normas técnicas para determinação das propriedades dos *pellets*.

<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>
Diâmetro	ISO 17829
Comprimento	ISO 17829
Teor de Umidade	ISO 18134
Teor de cinzas	ISO 18122
Durabilidade mecânica	ISO 17831-1
Porcentagem de finos (<3,15 mm)	ISO 18846
Poder calorífico inferior	ISO 18125
Densidade a granel	ISO 17828

Os teores de umidade e cinzas, poder calorífico inferior, densidade a granel e densidade energética dos *pellets* foram determinados da mesma forma descrita anteriormente para as espécies e para as misturas. A determinação das demais propriedades dos *pellets* é descrita a seguir.

#### 4.6.1 Determinação do diâmetro e comprimento dos *pellets*

Para a determinação do diâmetro e comprimento dos *pellets* foi usada uma amostra de 2,00kg, conforme determina a norma ISO 17829. Dentro dessa amostra foram escolhidos, de forma aleatória, 10 *pellets*, os quais tiveram seus diâmetros medidos com paquímetro digital. Para a determinação do comprimento dos *pellets*, dentro da mesma amostra de 2,00kg de *pellets*, foi retirada uma amostra representativa de cerca de 50g. Desta amostra de 50g foram retirados cerca de 50 *pellets* para determinação do comprimento, também com auxílio de um paquímetro digital.

#### 4.6.2 Determinação da durabilidade mecânica dos *pellets*

A durabilidade mecânica foi determinada de acordo com a Norma ISO 17831-1. Três amostras de 500g de *pellets* foram obtidas a partir de uma amostra inicial de, no mínimo, 2kg. Antes da realização do ensaio, o material foi peneirado utilizando-se uma peneira com abertura de malha de 3,36mm para eliminação dos finos. Cada uma dessas porções de 500g de *pellets* foi colocada em um friabilômetro (50 rotações por minuto) durante 10 minutos. Em seguida, a amostra era novamente classificada utilizando-se a peneira com abertura de malha de 3,36mm. A durabilidade mecânica foi obtida pela razão entre a massa de *pellets* retida na peneira após o ensaio e a massa inicial de *pellets* submetida ao ensaio no friabilômetro. A durabilidade mecânica foi obtida por meio da Equação 6.

$$DM = \frac{m_{pf}}{m_{pi}} * 100 \text{ Eq. (6)}$$

Onde:

DM: durabilidade mecânica em %, base úmida;

$M_{pf}$ : massa dos *pellets* após o ensaio, em g

$M_{pi}$ : massa dos *pellets* antes do ensaio, em g;

#### 4.6.3 Determinação do teor de finos dos *pellets* (partículas < 3,15mm)

Para determinação do teor de finos, foi utilizada uma amostra de aproximadamente 2kg de *pellets*, conforme estabelece a norma ISO 18846. O princípio da norma consiste no peneiramento manual da amostra de *pellets*, realizando 5-10 movimentos circulares suaves, de modo a separar os finos da amostra de *pellets*, mas ao mesmo tempo evitando a formação de novos finos. Para tal, a norma recomenda a utilização de uma peneira com orifícios circulares de 3,15mm de diâmetro. Devido à indisponibilidade da peneira em questão, ela foi substituída por uma com abertura de malha de 3,36mm. O teor de finos foi determinado conforme Equação 7.

$$F = \frac{m_{fin}}{m_p} * 100 \text{ Eq. (7)}$$

Onde:

F: teor de finos em %, base úmida;

$M_{fin}$ : massa de finos, em g;

$M_p$ : massa de *pellets*, em g.

## 4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Para avaliação do efeito de diferentes matérias-primas e teores de umidade na qualidade de *pellets* para fins energéticos foi utilizado um experimento fatorial 4x2, com quatro diferentes misturas de espécies amazônicas (M1, M2, M3 e M4) e dois teores de umidade (8 e 10%), totalizando 8 tratamentos, com número de réplicas específico para cada propriedade analisada. A análise foi realizada considerando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC). O efeito dos tratamentos sobre as propriedades dos *pellets* (diâmetro, comprimento, teor de umidade, teor de cinzas, durabilidade mecânica, poder calorífico inferior e densidade a granel) foi avaliado por meio de análise de variância (ANOVA). Foi adotado nível de significância de 5% e, confirmada a

rejeição da hipótese nula (valor  $P < 0,05$ ), aplicou-se o teste de *Tukey* para a diferenciação das médias. A análise estatística foi realizada no software SPSS 21.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 PROPRIEDADES DAS MATÉRIAS PRIMAS ESTUDADAS

Os teores de umidade e cinzas, densidade a granel e PCI das espécies amazônicas e das quatro misturas de espécies estudadas são mostrados respectivamente nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Teores de umidade e cinzas, densidade a granel e PCI das espécies estudadas.

Espécie	TU <sup>1</sup> (%)		CZ <sup>2</sup> (%)		DG <sup>1</sup> (kg/m <sup>3</sup> )		PCI <sup>1</sup> (MJ/kg)	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
Roxinho	9,31	1,17	0,35	1,29	316,37	2,06	17,05	0,13
Libra	10,48	0,54	0,83	1,19	276,86	0,43	16,69	0,00
Tamarindo	9,52	0,75	0,20	5,91	352,67	0,48	17,51	0,13
Ipê-roxo	8,96	0,62	0,18	3,14	335,27	0,54	17,74	0,23
Cumaru	8,47	0,15	0,22	6,36	406,86	0,56	17,56	0,02
Jequitibá	9,74	0,20	0,81	0,43	271,11	0,61	16,67	0,08

<sup>1</sup> Base úmida; <sup>2</sup> Base seca; TU: teor de umidade; CZ: teor de cinzas; DG: densidade a granel; PCI: poder calorífico inferior; CV: coeficiente de variação.

Tabela 8. Teores de umidade e cinzas, densidade a granel e PCI das misturas de espécies estudadas.

Misturas	TU <sup>1</sup> (%)		CZ <sup>2</sup> (%)		DG <sup>1</sup> (kg/m <sup>3</sup> )		PCI <sup>1</sup> (MJ/kg)	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
M1	9,88	0,21	0,55	5,17	294,68	0,75	17,10	0,29
M2	10,10	0,61	0,41	2,06	282,50	0,77	17,14	0,22
M3	9,62	0,11	0,23	1,57	303,73	0,22	17,49	0,29
M4	10,98	0,10	0,84	2,60	261,47	0,46	16,61	0,27

<sup>1</sup> Base úmida; <sup>2</sup> Base seca; TU: teor de umidade; CZ: teor de cinzas; DG: densidade a granel; PCI: Poder calorífico inferior; CV: coeficiente de variação.

Como apresentado na tabela 7, os teores de umidade não variaram muito entre as espécies, apresentando uma diferença de 2,01% entre o maior valor (Libra – 10,48%) e o menor valor (Cumaru – 8,47%); Entre as misturas (Tabela 8), essa diferença foi ainda menor, 1,32% entre o maior (Mistura 4 -10,98%) e o menor valor (Mistura 3 – 9,62%). Os teores de umidade tanto das espécies quanto das misturas se encontraram dentro da faixa de teor de umidade considerada adequada para peletização. No entanto, conforme relatado no item 3.3, o teor de umidade ideal para peletização varia em função da biomassa em questão, devendo ser ajustado de modo a obter *pellets* com durabilidade mecânica satisfatória.

Ressalta-se que o teor de umidade da madeira varia em função da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente, visto que se trata de um material higroscópico que tende a perder ou ganhar água, dependendo do meio onde se encontra (GLASS & ZELINKA, 2010). De acordo com o ICMBio (2010), a umidade relativa do ar na região da Floresta Nacional de Jacundá (Rondônia), local de origem da biomassa utilizada nas misturas, varia entre 80 e 90% durante o verão, podendo chegar a 75% durante o inverno; já em Brasília, cidade onde foram fabricados os *pellets*, a umidade relativa do ar varia em torno de 40%, podendo chegar a 12% no inverno (INPE, 2018).

Estima-se que com essas umidades relativas, os teores de umidade de equilíbrio máximo e mínimo da madeira em Rondônia seriam respectivamente próximos de 19 e 15%, enquanto em Brasília os valores máximo e mínimo oscilariam, respectivamente, em torno de 17 e 9% (GALVÃO, 1975). Desse modo, se os *pellets* fossem produzidos em Rondônia, provavelmente a biomassa teria de ser submetida a um maior tempo de secagem para que atingisse a faixa de umidade ideal para peletização, o que aumentaria os custos de produção. De acordo com PIRRAGLIA *et al.* (2010), a energia gasta na secagem da biomassa representa quase 70% da energia total utilizada na produção de *pellets* quando se usa matéria-prima verde.

O teor de umidade da matéria-prima influencia fortemente o processo de densificação durante a peletização e a durabilidade mecânica dos *pellets*, assunto que será discutido nos tópicos seguintes.

Com relação à densidade a granel, entre as espécies houve variação de 406,86 kg/m<sup>3</sup> (Cumaru) a 271,11 kg/m<sup>3</sup> (Jequitibá) e entre as misturas de 303,73 kg/m<sup>3</sup> (Mistura 3) a 261,47 kg/m<sup>3</sup> (Mistura 4). Em um estudo de caracterização energética de 11 espécies de madeiras amazônicas, NETO *et al.* (2006) encontraram o valor médio de densidade a granel de 245,81 g/cm<sup>3</sup>. Para efeito de comparação, a densidade a granel de serragem de *Pinus*, biomassa muito utilizada no Brasil para fabricação de *pellets*, oscila em torno de 230 Kg/m<sup>3</sup> (PROTÁSIO *et al.*, 2015).

A densidade a granel afeta a densidade energética do combustível, pois está relacionada com a quantidade de biomassa e os espaços vazios e, por consequência, os custos com transporte e armazenamento, tanto para o produtor quanto para o usuário final dos *pellets* (OBERNBERGER & THEK, 2004). Desse modo, a peletização, processo que permite a obtenção de *pellets* com densidades a granel superiores a 600 Kg/m<sup>3</sup>, tem papel fundamental na viabilização do uso de resíduos para fins energéticos.

Em relação ao teor de cinzas, todas as espécies apresentaram valores abaixo de 1%, sendo o maior valor encontrado para a Libra (0,86%) e o menor para o ipê-roxo (0,18%). SILVA *et al.*

(2014) encontraram para quatro espécies amazônicas valores de teor de cinzas também abaixo de 1%. O teor de cinzas das misturas variou de 0,23 (Mistura 3) a 0,84 % (Mistura 4), refletindo a contribuição do teor de cinzas das espécies que compõem a mistura. Por exemplo, o teor de cinzas teórico (média entre 0,81 e 0,22%) da mistura 1, formada por cumaru e jequitibá é 0,52%, muito próximo do teor de cinzas aferido para a referida mistura, que foi de 0,55%. O mesmo ocorre para as outras misturas, confirmando que as proporções das espécies nas diferentes misturas seguiram fielmente o quantitativo proposto na metodologia.

O teor de cinzas varia em função da espécie e representa a fração inerte da amostra que não é combustível e, portanto, quanto maior o seu valor, menor o poder calorífico (FURTADO *et al.*, 2010). O teor elevado desses elementos pode gerar problemas como acúmulo destes em forma de crostas no queimador dos *pellets*, comprometendo a vida útil do equipamento e a eficiência do processo de queima (OHMAN *et al.*, 2004). Desse modo, misturar espécies com teores de cinzas mais elevados com outras de teores reduzidos pode ser uma boa alternativa para maximizar o aproveitamento dos resíduos oriundos do processamento industrial da madeira.

O poder calorífico inferior não variou muito entre as espécies nem entre as misturas, oscilando entre 16,67 MJ/kg (jequitibá) e 17,74 MJ/kg (ipê-roxo) para as espécies e entre 16,61 (Mistura 4) e 17,49 MJ/kg (Mistura 3) para as misturas. O poder calorífico sofre influência da composição química do material, principalmente lignina e extrativos (GÜNTHER *et al.* 2012), bem como do teor de cinzas. O aumento dos primeiros afeta positivamente o poder calorífico enquanto o segundo apresenta um efeito negativo à medida que aumenta na biomassa, uma vez que as cinzas são compostas por elementos minerais que não contribuem para a queima do material (PROTÁSIO *et al.*, 2012; GARCIA *et al.*, 2018a, GÜNTHER *et al.* 2012). Conforme exigido pela norma ISO 17225-2, o poder calorífico inferior é obtido em base úmida, e, desse modo, o teor de umidade do material também influencia negativamente esta propriedade.

## 5.2 ANÁLISE DOS *PELLETS* PRODUZIDOS

Os *pellets* produzidos a partir dos oito diferentes tratamentos (M1TU8, M1TU10, M2TU8, M2TU10, M3TU8, M3TU10, M4TU8 E M4TU10) são mostrados na Figura 6.



Figura 6 – *Pellets* produzidos a partir das diferentes misturas de espécies amazônicas.

Como observado na Figura 6, os *pellets* variam em relação ao comprimento, textura e cor dentro do mesmo tratamento. Pegando como exemplo o tratamento M2TU10 (mistura que contém

todas as espécies estudadas, com 10% de teor de umidade) observa-se que existem *pellets* de diferentes comprimentos, alguns com textura lisa e cor escura, enquanto outros apresentam fissuras e cor mais clara. Uma das possíveis causas dessas variações é a possibilidade de haver pequenas diferenças de pressão e/ou temperatura ao longo da matriz peletizadora.

Existe ainda a possibilidade de a temperatura atingida pela matriz durante o ensaio não ser a ideal para todas as espécies que compõem a mistura, visto que a temperatura de transição vítrea da lignina (temperatura em que ela se torna plástica) varia entre diferentes espécies, devido a diferenças na composição química deste polímero (WHITTAKER & SHIELD, 2017).

Uma vez que a lignina atua como aglutinante durante a peletização, fluindo entre as partículas e preenchendo as fissuras e espaços vazios (STELTE, *et al.*, 2011a; STELTE, *et al.* 2011b; FERREIRA, 2017), temperaturas inferiores à temperatura de transição vítrea durante o ensaio poderiam dificultar o amolecimento da lignina, gerando *pellets* com fissuras e, portanto, menos resistentes.

### 5.2.1 Diâmetro e comprimento dos pellets

A Tabela 9 mostra um resumo da análise de variância para o diâmetro dos *pellets* produzidos e a Tabela 10 apresenta os valores médios para esta propriedade.

Tabela 9. Resumo da análise de variância para o diâmetro dos *pellets*.

Fonte de variação	Graus de liberdade	F	Valor-P
M- Mistura	3	1,373 <sub>ns</sub>	0,258
TU- Teor de umidade	1	0,851 <sub>ns</sub>	0,359
M * TU	3	2,640 <sub>ns</sub>	0,056
Erro	72		

ns: não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 10. Valores médios para o diâmetro dos *pellets* produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade.

Tratamento	Diâmetro dos <i>pellets</i> (mm)			
	TU8 - Teor de umidade de 8%		TU10 - Teor de umidade de 10%	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
M1 - Mistura 1	6,01	0,71	6,01	0,44
M2 - Mistura 2	6,00	0,57	6,00	0,63
M3 - Mistura 3	6,03	0,57	5,99	0,47
M4 - Mistura 4	5,99	0,50	6,00	0,42

CV: coeficiente de variação.

É possível observar na Tabela 9 que o diâmetro dos *pellets* não foi afetado pelos fatores testados (tipo de mistura e teor de umidade) nem pela interação entre eles. Não existe, portanto, diferença significativa entre os diâmetros médios dos *pellets* produzidos a partir dos oito tratamentos testados.

Pelos dados apresentados na Tabela 10, verifica-se que todos os tratamentos produziram *pellets* com variações de diâmetro aceitas pela Norma ISO 17225-2, que limita a  $\pm 1$ mm a variação nesta propriedade, independente do diâmetro em questão (6, 8, 10 ou 12 mm).

É importante ressaltar que embora o diâmetro dos orifícios da matriz (6 mm) imponha inevitavelmente um diâmetro próximo de 6 mm para os *pellets* produzidos, estes podem sofrer inchamento após a pelletização devido à fatores intrínsecos à matéria-prima (que influenciarão na adesão das partículas) ou a fatores ambientais, como por exemplo, a umidade relativa do ar. A variação excessiva no diâmetro dos *pellets* pode afetar negativamente a durabilidade mecânica destes, formando trincas e aumentando a geração de finos durante o transporte e manuseio (SIQUEIRA *et al.*, 2017).

A Tabela 11 mostra um resumo da análise de variância para o comprimento dos *pellets* e a Tabela 12 apresenta os valores médios para esta propriedade.

Tabela 11. Resumo da análise de variância para o comprimento dos *pellets*.

Fonte de variação	Grau de liberdade	F	Valor-P
M- Mistura	3	7,879 *	,000
TU- Teor de umidade	1	,202 ns	,654
M * TU	3	1,857 ns	,136
Erro	392		

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 12. Valores médios para o comprimento dos *pellets* produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade.

Tratamento	Comprimento dos <i>pellets</i> (mm)			
	TU8 - Teor de umidade de 8%		TU10 - Teor de umidade de 10%	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
M1 - Mistura 1	10,03 bA	66,63	12,33 bA	53,39
M2 - Mistura 2	16,93 aA	39,05	14,48 aA	50,03
M3 - Mistura 3	14,84 aA	53,96	14,24 aA	52,89
M4 - Mistura 4	15,35 aA	50,48	14,80 aA	47,26

CV: coeficiente de variação. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha, não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.



É possível observar na tabela 11 que o tipo de mistura afeta significativamente o comprimento dos *pellets* produzidos, enquanto o efeito do teor de umidade e da interação deste com o tipo de mistura não são significativos. Ou seja, a diferença significativa encontrada entre a média da mistura 1 e aquelas das demais misturas resultam unicamente das características intrínsecas das espécies que compõem a mistura 1, não havendo interferência do teor de umidade da amostra.

Pelos dados apresentados na Tabela 12, observa-se que houve grande variação entre os comprimentos dos *pellets* dentro do mesmo tratamento, o que é evidenciado pelos altos coeficientes de variação. Esta ampla variação é prevista pela Norma ISO 17225-2, a qual estipula comprimentos entre 3,15 e 40 mm para *pellets* destinados a usos industriais e não industriais (residencial e comercial). Conclui-se, portanto, que todos os tratamentos testados produziram *pellets* com comprimentos aceitos pela Norma em questão. Ressalta-se, no entanto, que *pellets* com comprimentos reduzidos tendem a apresentar menor durabilidade mecânica e gerar mais finos, conforme discutido no estudo conduzido por AKDENIZ *et al.* (2017).

FARIA *et al.* (2016) obtiveram valores médios de comprimento entre 14,85 e 16,18 mm para *pellets* produzidos com resíduos da cafeicultura, valores semelhantes aos encontrados neste estudo. Por outro lado, as médias de comprimento encontradas neste estudo são inferiores aos valores médios encontrados por PINTO *et al.* (2015) para *pellets* produzidos com resíduos de ponteira de Eucalipto (20,90mm) e por Garcia *et al.* (2018a) para *pellets* produzidos com resíduos de *pinus* (20,30) e serragem de ipê (21,70mm). Esses autores também encontraram valores de durabilidade mecânica superiores aos encontrados neste estudo, conforme será discutido no item 5.2.4. Essas diferenças são devidas à utilização de diferentes matérias primas e à variação das condições operacionais dos equipamentos de peletização entre diferentes estudos.

Desse modo, entre os tratamentos testados, analisando isoladamente o comprimento como indicador de qualidade dos *pellets*, pode-se concluir que a mistura 1 com teor de umidade de 8% (MITU8) é a menos indicada para a produção de *pellets*, enquanto as outras três misturas não diferem entre si, independente do teor de umidade.

### 5.2.2 Teor de umidade dos *pellets*

A Tabela 13 mostra um resumo da análise de variância para o teor de umidade dos *pellets* e a Tabela 14 apresenta os valores médios para esta propriedade.

Tabela 13. Resumo da análise de variância para o teor de umidade dos *pellets*.

Fonte de variação	Grau de liberdade	F	Valor-P
M- Mistura	3	261,484*	,000
TU- Teor de umidade	1	704,807*	,000
M * TU	3	7,475*	,002
Erro	16		

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F

Tabela 14. Valores médios para o teor de umidade dos *pellets* produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade.

Tratamento	Teor de umidade dos <i>pellets</i> (mm), bu			
	TU8 - Teor de umidade de 8%		TU10 - Teor de umidade de 10%	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
M1 - Mistura 1	2,40 bA	1,23	2,95 cB	1,59
M2 - Mistura 2	1,70 aA	3,23	2,36 aB	2,62
M3 - Mistura 3	1,72 aA	5,01	2,54 bB	2,53
M4 - Mistura 4	2,55 cA	1,28	3,09 cB	2,45

Bu: base úmida. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha, não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A análise de variância (Tabela 13) mostrou que o tipo de mistura, quando analisado isoladamente, influencia significativamente o teor de umidade dos *pellets* produzidos. As misturas 2 (todas as espécies) e 3 (roxinho, tamarindo, ipê-roxo e cumaru-ferro) produziram os *pellets* com os menores teores de umidade, independente do teor de umidade da matéria-prima (8 ou 10%).

Ao analisar o efeito isolado do teor de umidade da mistura sobre o teor de umidade do *pellet* na Tabela 14, observa-se que o primeiro influencia significativamente o segundo para todas as misturas testadas. Ou seja, analisando isoladamente esta propriedade (teor de umidade dos *pellets*), pode-se inferir que é preferível peletizar as misturas a 8% de teor de umidade, visto que são obtidos *pellets* com teores de umidade significativamente menores. No entanto, o teor de umidade da matéria-prima a ser peletizada pode influenciar outras propriedades dos *pellets*, e isto deve ser considerado ao se decidir pelo teor de umidade ideal a ser utilizado. TUMULURU *et al.* (2011) destacam, por exemplo, que *pellets* com teores de umidade inferiores a 5% podem ser mais propensos à quebra, com aumento da geração de finos.

Pelos dados apresentados na Tabela 14, verifica-se que todos os tratamentos produziram *pellets* com teores de umidade dentro dos limites estabelecidos pela Norma ISO 17225-2, que exige valores inferiores a 10% (base úmida) para *pellets* destinados a uso residencial, comercial ou industrial.

SOUZA *et al.* (2012) e RHÈN *et al.*, (2005) afirmam que o teor de umidade inicial da biomassa é a variável mais importante para o controle de umidade do produto final e que para materiais lignocelulósicos, altos valores de teor de umidade se correlacionam de forma negativa com o poder calorífico. Além de influenciar negativamente o poder calorífico, altos teores de umidade interferem no processo de densificação da biomassa, impactando diretamente a durabilidade mecânica dos *pellets*, como será discutido no tópico 5.2.4.

### 5.2.3 Teor de cinzas dos *pellets*

A Tabela 15 mostra um resumo da análise de variância para o teor de cinzas dos *pellets* e a Tabela 16 apresenta os valores médios para esta propriedade.

Tabela 15. Resumo da análise de variância para o teor de cinzas dos *pellets*.

Fonte de variação	Grau de liberdade	F	Valor-P
M- Mistura	3	645,492 *	,000
TU- Teor de umidade	1	2,238 <sub>ns</sub>	,173
M * TU	3	1,289 <sub>ns</sub>	,343
Erro	8		

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 16. Valores médios para o teor de cinzas dos *pellets* produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade.

Tratamento	Teor de cinzas dos <i>pellets</i> (%) bs			
	TU8 - Teor de umidade de 8%		TU10 - Teor de umidade de 10%	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
M1 - Mistura 1	0,53 cA	0,27	0,57 cA	0,11
M2 - Mistura 2	0,41 bA	4,90	0,43 bA	2,33
M3 - Mistura 3	0,22 aA	5,96	0,21 aA	3,02
M4 - Mistura 4	0,85 dA	6,19	0,84 dA	0,35

bs: base seca. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha, não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Como esperado, o teor de cinzas difere significativamente entre as misturas testadas (Tabela 15), visto que este parâmetro foi ajustado em duas das misturas testadas (M3 – cinzas <0,7% e M4 com cinzas entre 0,7 e 1,2%).

Os valores médios para o teor de cinzas dos *pellets* mostrados na Tabela 16 são, como esperado, muito próximos ou iguais àqueles das misturas que os deram origem.

Pelos dados apresentados na Tabela 16, verifica-se que as misturas 1, 2 e 3, independente do teor de umidade em que elas foram peletizadas, produzem *pellets* com teores de cinzas equivalentes

à categoria A1 (<0,7%), correspondente ao uso residencial/comercial mais restrito. Os *pellets* oriundos da mistura 4, com teor de cinzas de ~0,85%, enquadram-se como A2, segunda melhor categoria de qualidade, de acordo com a Norma ISO 17225-2.

Em um estudo com *Pinus caribaea var. hondurensis* MORAES *et al.* (2018) encontraram o valor médio para teor de cinzas de 0,21%, valor muito próximo ao encontrado para a mistura 3. GARCIA *et al.* (2018a) encontraram 0,60% de teor de cinzas para *pellets* de madeira de *pinus* fabricados em uma indústria de Santa Catarina e 0,77% para *pellets* produzidos com serragem de *Tabebuia spp.* FERREIRA (2017) analisou *pellets* produzidos com resíduos de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e Maçaranduba (*Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach.) e encontrou respectivamente 0,35 e 0,65% de teor de cinzas.

Ressalta-se, portanto, que apesar de espécies tropicais em geral apresentarem teores de cinzas ligeiramente mais elevados que o *Pinus*, madeira mais utilizada para produção de *pellets* no Brasil, os teores de cinzas podem ser reduzidos realizando-se misturas de espécies. O teor de cinzas é um dos mais importantes parâmetros de qualidade de *pellets* para uso energético, pois as cinzas são compostas por elementos inorgânicos que interferem negativamente na queima do combustível, além de se acumularem no equipamento de combustão formando crostas que provocam a corrosão do dispositivo (TOSCANO *et al.*, 2013).

#### 5.2.4 Durabilidade mecânica e teor de finos dos *pellets*

A Tabela 17 mostra um resumo da análise de variância para a durabilidade mecânica dos *pellets* e a tabela 18 apresenta os valores médios para esta propriedade.

Tabela 17. Resumo da análise de variância para a durabilidade mecânica dos *pellets*.

Fonte de variação	Grau de liberdade	F	Valor-P
M- Mistura	3	219,124 *	,000
TU- Teor de umidade	1	203,437 *	,000
M * TU	3	50,718 *	,000
Erro	16		

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 18. Valores médios para a durabilidade mecânica dos *pellets* produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade.

Tratamento	Durabilidade mecânica dos <i>pellets</i> (%) bu			
	TU8 - Teor de umidade de 8%		TU10 - Teor de umidade de 10%	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
M1 - Mistura 1	87,89 aB	0,24	88,69 bA	0,28
M2 - Mistura 2	84,61 cB	0,23	87,80 cA	0,66
M3 - Mistura 3	85,96 bB	0,35	90,40 aA	0,14
M4 - Mistura 4	83,71 dA	0,32	83,64 dA	0,72

bu: base úmida. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha, não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A análise de variância mostrada na Tabela 17 indicou que a durabilidade mecânica dos *pellets* é afetada significativamente pelo tipo de mistura e pelo teor de umidade utilizado. Além disso, como o efeito da interação entre mistura e teor de umidade foi significativo, é possível afirmar que o efeito do teor de umidade da matéria-prima sobre a durabilidade mecânica dos *pellets* depende do tipo de mistura. Ou seja, algumas misturas, em função de sua composição, podem ser mais afetadas que outras pelo teor de umidade, impactando a durabilidade mecânica dos *pellets* com intensidades diferentes.

Como apresentado na Tabela 18, todas as misturas diferem estatisticamente entre si em relação à durabilidade mecânica dos *pellets*, tanto quando peletizadas a 8 quanto a 10% de teor de umidade. A durabilidade mecânica dos *pellets* foi maior quando as misturas foram peletizadas a 10% de teor de umidade, com exceção da mistura 4, cujos *pellets* apresentaram durabilidades mecânicas estatisticamente iguais, independente do teor de umidade da mistura (8 ou 10%).

Quando peletizadas com 10% de teor de umidade, a mistura 3 (mistura de espécies com o menor teor de cinzas) mostrou o melhor desempenho, com *pellets* apresentando durabilidade de 90,40%, seguida pelas misturas 1, 2 e 4, que apresentaram respectivamente 88,69%, 87,80% e 83,64% de durabilidade mecânica. Considerando a peletização das misturas com 8% de teor de umidade, a mistura 1 (Cumaru e Jequitibá) produziu *pellets* com a maior durabilidade mecânica (87,89%), seguida pelas misturas 3, 2 e 4, em ordem decrescente de durabilidade. Para os dois teores de umidade testados (8 e 10%), a mistura 4 (espécies com o maior teor de cinzas) apresentou as menores durabilidades mecânicas, 83,71 e 83,64%, respectivamente para os teores de umidade de 8 e 10%.

O teor de umidade da matéria-prima tem um papel crucial durante o processo de peletização, pois atua como agente ligante, aumentando a área de contato entre as partículas e, ao mesmo tempo

como lubrificante, reduzindo o atrito entre o *pellet* que está sendo formado e as paredes do orifício da matriz peletizadora (KALIAN & MOREI, 2009).

WHITTAKER & SHIELD (2017) revisam os fatores que afetam a durabilidade mecânica de *pellets* e destacam que o teor de umidade da matéria-prima pode influenciá-la positiva ou negativamente, devendo ser ajustado em função do tipo de biomassa. Como fator positivo, o autor destaca que a água reduz a temperatura de transição vítrea da lignina, melhorando a adesão entre as partículas a temperaturas mais baixas. Como efeito negativo, ele ressalta que a água, por ser um fluido incompressível, limita a densidade final dos *pellets*, além de em excesso, aumentar a possibilidade de inchamento *destes*, reduzindo sua durabilidade. Desse modo, conforme destacam KALIAN & MOREI (2009), a durabilidade mecânica do *pellet* aumenta com o aumento do teor de umidade da matéria-prima até um ponto ótimo a partir do qual essa propriedade será negativamente afetada.

É importante ressaltar também que a durabilidade mecânica dos *pellets* será afetada não só pelo teor, mas também pelo tipo de lignina da matéria-prima, uma vez que a temperatura de transição vítrea da lignina varia de acordo com sua composição (WHITTAKER & SHIELD, 2017). LINDLEY & VOSSOUGH (1989) destacam que a água é particularmente útil na compactação de matérias-primas contendo constituintes solúveis em água, como amido, carbonato de sódio, fosfato de sódio, sais de potássio, cloreto de cálcio etc. Desse modo, a mistura 4, material que possui teor de cinzas mais elevado e cujos *pellets* apresentaram a pior durabilidade mecânica, poderia eventualmente ser beneficiada, se peletizada com teores de umidade superiores aos testados no presente estudo.

Em um estudo com resíduos lignocelulósicos da cultura de café, FARIA *et al.* (2016) obtiveram valores de durabilidade mecânica entre 94,51 e 98,07%, valores maiores do que os encontrados no presente estudo. GARCIA *et al.* (2018a) conduzindo um estudo com *pellets* produzidos a partir da madeira de *pinus*, madeira nativa (*Tabebuia spp.*) e bagaço de cana, obtiveram valores médios para durabilidade mecânica de 98,6%, 97,7% e 97,5% respectivamente. Estes últimos autores não informam o teor de umidade em que a matéria-prima foi peletizada, mas os *pellets* produzidos apresentaram 6,10 (*pinus*), 10,65 (ipê) e 7,27% (bagaço de cana) de teor de umidade, mais que o dobro do teor de umidade dos *pellets* do presente estudo. Segundo TUMULURU *et al.* (2011), *pellets* com teor de umidade inferior a 5% são mais suscetíveis à quebra e geração de finos, o que poderia explicar parcialmente a menor durabilidade mecânica encontrada no presente estudo.

A durabilidade mecânica mostrou-se uma propriedade limitante para a qualidade dos *pellets*, pois apesar da melhoria observada quando as misturas são peletizadas com teor de umidade de 10%, nenhuma delas permitiu a obtenção de *pellets* que se enquadrem nas classes de qualidade indicadas para uso residencial, comercial ou industrial de acordo com a norma ISO 17225-2.

A durabilidade mecânica é uma propriedade relacionada ao transporte e manuseio dos *pellets*, representando a capacidade destes de resistir a impactos e/ou atritos (CARONE *et al.*, 2011). Quanto maior a durabilidade, menor a geração de finos, o que reduz o risco de explosão nos compartimentos de carga durante o transporte e manuseio (LEHTIKANGAS, 2001). Dada à importância desta propriedade, a Norma ISO 17225-2 exige no mínimo 96,5% de durabilidade independente do uso final dos *pellets*, sendo que para pellets de uso residencial/comercial nas classes mais restritas, A1 e A2, é exigido no mínimo 97,5%.

A durabilidade mecânica, como já mencionado, está diretamente relacionada com a porcentagem de finos. Os valores para esta propriedade são mostrados na tabela 19. Devido à limitação na quantidade de *pellets* disponível para este ensaio, só foi possível realizar uma medição para esta propriedade.

Tabela 19. Valores médios para o teor de finos dos *pellets* produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade.

Tratamento	Teor de finos dos <i>pellets</i> (%) bu	
	TU8 - Teor de umidade de 8%	TU10 - Teor de umidade de 10%
M1 - Mistura 1	0,83	0,62
M2 - Mistura 2	0,99	0,95
M3 - Mistura 3	1,06	0,70
M4 - Mistura 4	1,22	0,91

bu: base úmida.

Como observado na Tabela 19, as misturas peletizadas com 10% de teor de umidade geram *pellets* que produzem menor quantidade de finos, o que é coerente com os maiores valores de durabilidade mecânica encontrados para este teor de umidade (Tabela 18). Os menores teores de finos foram observados para as misturas 1 e 3, misturas que também apresentaram as melhores durabilidades mecânicas. As misturas 2 e 4 apresentaram maiores teores de finos, porém, quando peletizadas com teor de umidade de 10% todas as misturas apresentam teor de finos inferior a 1%, valor máximo aceitável pela Norma ISO 17225-2 para usos residencial e comercial. Para usos industriais, classes de qualidade I1, I2 e I3, são aceitos respectivamente teores de finos menores que 4%, 5% e 6%.

Em um estudo com *pellets* produzidos a partir de diferentes proporções de *pinus* e ponta de araucária, BRAND *et al.*, (2018) encontraram valores de teor de finos entre 0,46 e 1,33%. TUMULURU *et al.* (2010) obtiveram valores entre 0,03 e 0,87% para *pellets* produzidos a partir de três diferentes madeiras de baixa densidade. Esses últimos autores, tal como no presente estudo, por indisponibilidade da peneira com abertura de malha de 3,15 mm exigida pela norma, utilizaram uma com abertura de 3,35mm, o que segundo eles, pode ter superestimado o teor de finos.

A porcentagem de finos é um parâmetro que interfere no armazenamento e transporte dos *pellets* e, em grandes quantidades, pode causar risco para a saúde pela inalação da poeira gerada e perigo de explosão (BARROS, 2013). Esse autor ressalta ainda que durante a combustão, a quantidade de finos tem influência no comportamento da queima das partículas e pode causar entupimento ou danos no sistema de alimentação.

### 5.2.5 Densidade a granel dos *pellets*

A Tabela 20 mostra um resumo da análise de variância para a densidade a granel dos *pellets* e a tabela 21 apresenta os valores médios para esta propriedade.

Tabela 20. Resumo da análise de variância para a densidade a granel dos *pellets*.

Fonte de variação	Grau de liberdade	F	Valor-P
M- Mistura	3	50,809 *	0,000
TU- Teor de umidade	1	5,801 *	0,028
M * TU	3	10,314 *	0,001
Erro	16		

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 21. Valores médios para a densidade a granel dos *pellets* produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade.

Tratamento	Densidade a granel dos <i>pellets</i> (kg/m <sup>3</sup> ) bu			
	TU8 - Teor de umidade de 8%		TU10 - Teor de umidade de 10%	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
M1 - Mistura 1	690,40 aA	1,78	682,11 aA	1,11
M2 - Mistura 2	657,27 bA	0,83	665,77 bA	0,67
M3 - Mistura 3	669,63 bA	0,57	641,03 cB	0,62
M4 - Mistura 4	640,80 cA	0,46	644,41 cA	0,67

bu: base úmida. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha, não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A análise de variância mostrada na Tabela 20 indicou que a densidade a granel dos *pellets* é afetada significativamente pelo tipo de mistura e pelo teor de umidade da matéria-prima. Além



disso, como a interação entre mistura e teor de umidade foi significativa, é possível afirmar que o efeito do teor de umidade da matéria-prima sobre a densidade a granel dos *pellets* depende do tipo de mistura.

Como apresentado na Tabela 21, a densidade a granel dos *pellets* não diferiu estatisticamente entre os dois teores de umidade testados para as misturas 1, 2 e 4. Os *pellets* oriundos da mistura 3 apresentaram densidade a granel significativamente maior quando esta foi peletizada com teor de umidade de 8%. Os maiores valores de densidade a granel ( $690,40 \text{ kg/m}^3$  e  $682,11 \text{ kg/m}^3$ ) foram encontrados para os *pellets* produzidos a partir da mistura 1, independente do teor de umidade. Os valores mais baixos para esta propriedade foram observados para a mistura 4, cujos *pellets* apresentaram densidade a granel de  $640,80 \text{ kg/m}^3$  e  $644,41 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente para os teores de umidade de 8 e 10%.

Todos os *pellets* produzidos atendem à norma ISO 17225-2, que estabelece  $600 \text{ Kg/m}^3$  como valor mínimo para densidade a granel, independente do uso final do *pellet* (residencial, comercial ou industrial). GUO, *et al.* (2013), em um estudo com *pellets* de coníferas, obtiveram valores semelhantes ao encontrado neste estudo, entre 660 e  $670 \text{ kg/m}^3$ . FERREIRA (2017) também encontrou valores de densidade a granel próximos aos encontrados no presente estudo, obtendo  $639,35$  e  $637,28 \text{ kg/m}^3$  respectivamente para *pellets* produzidos com resíduos de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e Maçaranduba (*Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach.). LIU *et al.* (2016), trabalhando também com misturas de biomassas, verificaram que ao misturar uma porcentagem de 60% de bambu e 40% de *pinus*, a densidade a granel atendia as exigências de utilização.

Há uma relação direta entre densidade a granel e densidade energética, que na prática se traduz na possibilidade de carregamento de mais energia no mesmo espaço do caminhão ou navio cargueiro, barateando o custo final do serviço de transporte e tornando esse biocombustível mais competitivo (GARCIA *et al.*, 2018a).

#### 5.2.6 Poder calorífico inferior dos *pellets*

A Tabela 22 mostra um resumo da análise de variância para o poder calorífico inferior (PCI) dos *pellets* e a tabela 23 apresenta os valores médios para esta propriedade.

Tabela 22. Resumo da análise de variância para o poder calorífico inferior dos *pellets*.

Fonte de variação	Grau de liberdade	F	Valor-P
M- Mistura	3	368,999*	,000
TU- Teor de umidade	1	60,795*	,000
M * TU	3	,645 <sub>ns</sub>	,597
Erro	16		

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 23. Valores médios para o PCI dos *pellets* produzidos a partir de quatro misturas de resíduos de madeiras amazônicas com diferentes teores de umidade.

Tratamento	Poder calorífico inferior dos <i>pellets</i> (MJ/Kg) bu			
	TU8 - Teor de umidade de 8%		TU10 - Teor de umidade de 10%	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
M1 - Mistura 1	18,65 cA	0,28	18,54 cB	0,17
M2 - Mistura 2	19,08 bA	0,33	18,93 bB	0,06
M3 - Mistura 3	19,32 aA	0,08	19,14 aB	0,22
M4 - Mistura 4	18,53 dA	0,36	18,40 dB	0,25

bu: base úmida. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha, não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey..

Como mostrado na Tabela 22, existe efeito do tipo de mistura e do teor de umidade delas no PCI dos *pellets*. Já o efeito da interação entre mistura e teor de umidade não foi significativo, indicando que o efeito do teor de umidade sobre o PCI não é afetado pelo tipo de mistura.

Como apresentado na Tabela 23, todas as misturas diferem estatisticamente entre si em relação ao PCI dos *pellets*, tanto quando peletizadas a 8 quanto a 10% de teor de umidade. O PCI dos *pellets* foi maior quando as misturas foram peletizadas a 8% de teor de umidade, evidenciando o impacto do teor de umidade nesta propriedade. Independente do teor de umidade em que foi peletizada, a mistura 3 (mistura de espécies com o menor teor de cinzas) produziu *pellets* com os maiores PCI's (19,32 e 19,14 MJ/Kg), seguida pelas misturas 2, 1 e 4, em ordem decrescente de PCI.

Os *pellets* oriundos da mistura 4 apresentaram os menores PCI's, refletindo o maior teor de cinzas dessa mistura. Em um estudo com *pellets* de diferentes madeiras de coníferas e folhosas TELMO & LOUSADA (2011) encontraram para coníferas valores de PCI entre 19,66 e 20,36 MJ/kg e, para as folhosas, valores entre 17,63 e 20,81 MJ/kg. GARCIA *et al.* (2018a) encontraram 19,15 MJ/kg, 17,02 MJ/Kg e 16,48 MJ/Kg respectivamente para *pellets* de madeira de pinus, ipê e bagaço de cana, valores que também refletem o teor de cinzas do material.

Em relação ao PCI, todos os *pellets* produzidos a partir das diferentes misturas e teores de umidade atenderam às especificações da Norma ISO 17225-2, que exige valores maiores ou iguais a 16,5 MJ/Kg, independente do uso final do pellet (residencial, comercial ou industrial).

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE MATÉRIA-PRIMA E *PELLETS*: PCI, DENSIDADE A GRANEL E DENSIDADE ENERGÉTICA

Os valores médios de poder calorífico inferior, densidade a granel e densidade energética da matéria-prima (antes do ajuste do teor de umidade) e dos *pellets* são mostrados respectivamente nas Figuras 7, 8 e 9.

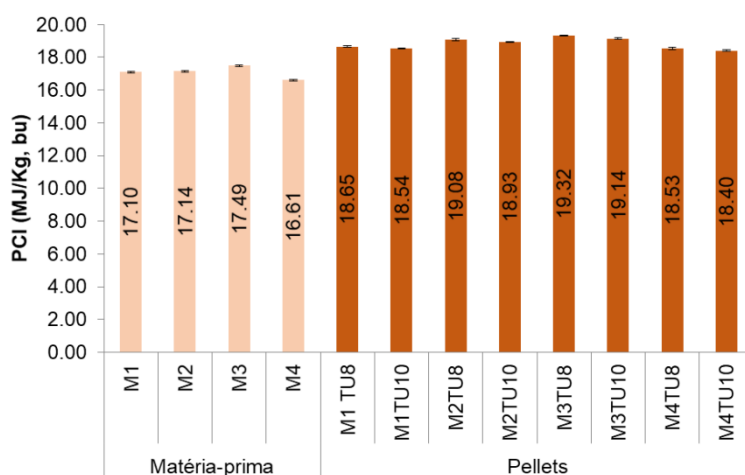


Figura 7 – PCI das misturas antes e depois da peletização. Bu: base úmida.

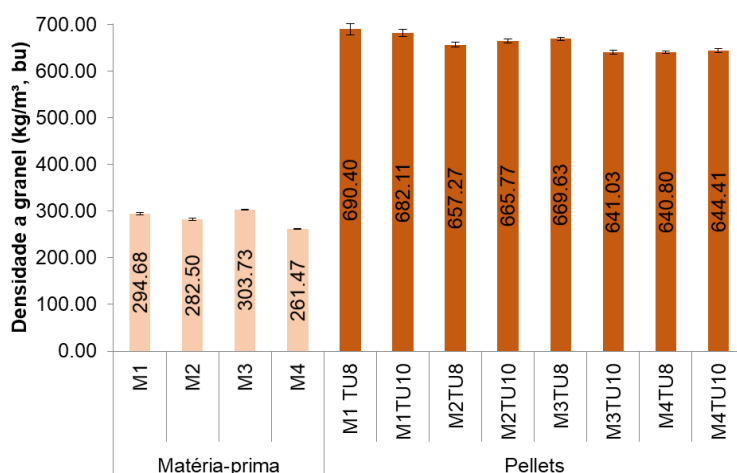


Figura 8 – Densidade a granel das misturas antes e depois da peletização. Bu: base úmida.

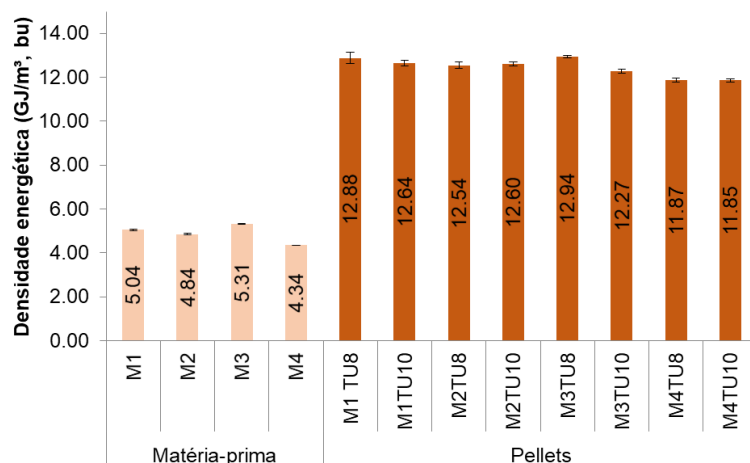


Figura 9 – Densidade energética das misturas antes e depois da peletização. Bu: base úmida.

Conforme apresentado nos itens 5.1 e 5.2.2, o teor de umidade da matéria-prima (misturas) antes do ajuste era de 9,88, 10,10, 9,62 e 10,98%, respectivamente para as misturas 1, 2, 3 e 4 (base úmida) e o teor de umidade dos *pellets* variou de 1,70 a 3,09%. Conseqüentemente, o PCI dos *pellets* é ligeiramente superior àqueles das matérias-primas (Figura 7).

Densidade energética é uma propriedade que relaciona a densidade do material e o poder calorífico, traduzindo, portanto, a quantidade de energia que pode ser transportada por unidade de volume. Como observado na Figura 6, devido ao menor teor de umidade dos *pellets*, o PCI deles é ligeiramente superior àqueles das matérias-primas. Já em relação à densidade a granel (Figura 8), como esperado, a diferença entre matéria-prima e *pellets* é bem acentuada, visto que, em média, foi obtida uma taxa de compactação de 2,3 (densidade a granel dos *pellets*/densidade a granel da matéria-prima). Conclui-se, portanto, que a densidade a granel foi a propriedade que mais influenciou nos valores da densidade energética (Figura 9).

Como a densidade a granel não varia muito entre os *pellets* das diferentes misturas, a densidade energética dos mesmos também não apresentou grande variação. Os *pellets* oriundos da mistura 3, peletizada a 8% de teor de umidade, apresentaram a maior densidade energética (12,94 GJ/m<sup>3</sup>), enquanto os *pellets* oriundos da mistura 4 peletizada a 10% de teor de umidade, obtiveram o pior desempenho (11,85 GJ/m<sup>3</sup>).

FERREIRA (2017) produziu *pellets* de serragem de Angelim-vermelho e Maçaranduba, e constatou que a densidade energética dos *pellets* era cerca de duas vezes maior que a densidade energética da serragem para ambas as espécies, aumentando de 5,8 para 12,12 GJ/m<sup>3</sup> e de 5,78 para 11,96 GJ/m<sup>3</sup>, respectivamente para o Angelim vermelho e a Maçaranduba. Taxas semelhantes de

densificação energética foram encontradas no presente estudo, confirmando a relevância do processo de peletização para o transporte e armazenamento de resíduos de biomassa.

## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Embora os parâmetros de peletização e adequações na matéria-prima ainda demandem estudos, todas as misturas testadas se mostraram tecnicamente viáveis para a produção de *pellets* para fins energéticos.

As misturas 1, 2 e 3, nos dois teores de umidade testados, produziram *pellets* cujo diâmetro, comprimento, teor de umidade, teor de cinzas, densidade a granel e poder calorífico inferior correspondem à classe A1 (melhor classe de qualidade, de acordo com Norma ISO 17225-2). Já para os *pellets* da mistura 4, os valores obtidos para essas propriedades enquadram-se na classe A2, devido ao teor de cinzas mais elevado.

Nenhum dos tratamentos testados permitiu a produção de *pellets* com durabilidade mecânica mínima de 96,5% exigida pela Norma ISO 17225-2. Os *pellets* da mistura 3, peletizada com 10% de teor de umidade, apresentaram a maior durabilidade mecânica (90,4%). O aumento do teor de umidade das misturas (de 8 para 10%) impactou positivamente a durabilidade mecânica dos *pellets* das misturas 1, 2 e 3 e reduziu o teor de finos dos *pellets* de todas as misturas.

O processo de peletização aumentou a densidade a granel dos resíduos, em média, em 2,31 vezes e a densidade energética em 2,55 vezes.

Recomenda-se para estudos posteriores, testar teores de umidade mais elevados, como por exemplo, 12%, principalmente para a mistura 2 (todas as espécies), de modo a fomentar a utilização diversificada de espécies. Sugere-se ainda, a determinação do teor de metais pesados e outros elementos exigidos pela Norma ISO 17225-2, ensaios de combustão, além da realização de pré-tratamentos de torrefação da matéria-prima.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEBIOM. **Bioenergy Europe. Statistical Report.** 2018 Edition. . Brussels: [s.n.], 2018.

AKDENIZ, C.R. ESMER, O. **Effects of length on mechanical durability of various wood pellets.** Hungarian Agricultural Engineering. v.32. p.62-71. 2017.

BARROS, A.S.C. **Produção de Pellets para valorização de resíduos provenientes da indústria corticeira.** 2013. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Faculdade de engenharia. p.1-142. 2013.

BATTACHARYAM S.C; SETT, S; SHRESTHA, R.M. **State of the Art for biomass Densification.** Energy Sources. v.11. n.3. pg.161-182. 1989.

BRAND, A.M. JACINTO, C.R. CUNHA, da B.A. **Qualidade de pellets de galhos secos de araucária e partículas de pinus.** Energia Agricultura. Botucatu, SP. vol.33. n.4. p.303-312. 2018.

BRAND, A.M; MUNIZ, B.I.G; SILVA, A.D; KLOCK, U. **Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais.** Revista Floresta. ed.32. vol.2. pg.247-259. 2002.

CARONE, M.T. PANTALEO, A, PELLERANO, A. **Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L.** Biomass and Bioenergy. v.35(1). p.402–410. 2011

COUTO, L; MULLER, D.M; SILVA JÚNIOR, G.A; CONDE, N.J.L. **Produção de pellets de madeira – o caso da Bio-Energy no Espírito Santo.** Revista Biomassa & Energia, v.1. n.1. p.45-52. 2004

CORONEL, A.D. LAGO, A. LENGLER, L. SILVA, N.T. **O aproveitamento dos resíduos do setor florestal de Lages, Santa Catarina.** XIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Londrina, PR. 2007

CUPERTINO, S. A. **Pellets de Madeira como uma Alternativa para a Geração Termelétrica no Brasil.** Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/ Senado, Junho/2017 (Texto para Discussão nº 235), 2017. Disponível em: <[www.senado.leg.br/estudos](http://www.senado.leg.br/estudos)>

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanço Energético de 2018, ano base 2017.** Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao303/topico397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>>. Acessado em 30 de dez. 2018.

FARIA, *et al.* **Transformação dos resíduos lignocelulosicos da cafeicultura em pellets para a geração de energia térmica.** Coffee Science. Lavras, MG. v.11. n.1. p.137-147. 2016

FERREIRA, G. **Viabilidade técnica da produção de pellets de resíduos de madeira das espécies *Dinizia excelsa* e *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach para fins energéticos.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharia. pg.1-54. 2017.

FIGUEROA, M.J.M; MORAES de, D.P. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas.** Ambiente Construído. Porto Alegre. v.9. n.4. p.157-174. 2009.

FURTADO, T.S.; VALIN, M.; BRAND. A.M.; BELLOTE, J.F.A. **Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal.** Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo. v.30. n.62. p.101-106. .2010.

GALVÃO, M.P.A. **Estimativa da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil.** IPEF n.11. p.53-65. 1975.

GARCIA, P.D; CARASCHI, C.J; VENTORIM, G. **Caracterização energética de pellets de madeira.** Revista da Madeira. n.2. v.135. p.18-54. São Paulo. 2013.

GARCIA, P.D. CARASCHI, C.J. VENTORIM, G. PRATES, A.G. PROTÁSIO, P.T. **Qualidade dos pellets de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225.** *Ciência da Madeira*. v.9. n.1. pg.45-53. 2018a.

GARCIA, P.D. CARASCHI, C.J. DAL BEM, A.E. FERREIRA, P.J. SOUZA, L.M.F. VIEIRA A.H.F. DIAS, R.R. **Mapa dos produtores brasileiros de biocombustíveis.** *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. v.12. ed.4. pg.333-339. 2018b.

GENTIL, Luiz Vicente Bocorny. (2008). **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira.** Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Publicação EFL TD – 009/2008. Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. Brasília. DF, 195 p.

GIACOMO, DI G. TAGLIERI, L. **Renewable energy benefits with conversion of woody residues to pellets.** *Energy*. ed.34. pg.724-731. 2005.

GLASS, V.S. ZELINKA, L.S. **Moisture relations and physical properties of wood.** *Wood Handbook-Wood as an engineering material. General Technical Report. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madson, USA. Cap.4. pg.4-10. 2010.*

GOMES, I.J; SAMPAIO, S.S. **Aproveitamento do resíduo de madeira em três empresas madeireiras no estado do Pará.** Embrapa Amazônia-Oriental. Comunicado técnico 102. Belém, PA. 2004.

GÜNTHER, Björn et al. **Calorific value of selected wood species and wood products.** *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 70, n. 5, p. 755-757, 2012.

GUO, W. LIM, J.C. BI, X. SOKHANSANJ, S. MELIN S. **Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets.** *Fuel*. v.103. p.347–355. 2013

ITTO. 2016. **Biennial Review and Assessment of the World Timber Situation 2015-2016.** Disponível em: [https://www.itto.int/direct/topics/topics\\_pdf\\_download/topics\\_id=5194&no=1](https://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=5194&no=1)>Acesso em:19/12/18.

JACINTO, C.R. **Produção de pellets para energia utilizando diferentes resíduos de biomassa agrícolas e florestais.** Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade de Estado de Santa Catarina, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal. p.1-80. Lages, SC. 2017.

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

LEHITIKANGAS, P. **Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark.** *Biomass and Bioenergy*, v.20(5). p.351–360. 2001.

LINDLEY, J. A.; VOSSOUGH, M. Physical properties of biomass briquets. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 361-0366, 1989.

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

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

Ministério do Meio Ambiente – Instituto Chico Mendes. **Plano de manejo, Floresta Nacional de Jacundá, Rondônia**. Vol.1. Disponível em: <[http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas\\_brasileiros/amazonia/unidades-de-conservacao-amazonia/1937-flona-de-jacunda](http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas_brasileiros/amazonia/unidades-de-conservacao-amazonia/1937-flona-de-jacunda)>. Acessado em 23 de set. 2018.

MORAES, de A.D.M. SANTOS dos H.J. LIMA, F.A.P. CONEGLIAN, A. SOUZA de Jr., D.A. CANTO, do L.J. SETTE Jr., R.C. **Bioenergia com resíduos do desdobro da madeira de *Pinus caribaea var. hondurensis***. Revista de Ciências Agrárias. v.42. ed.(2). p.520-527.2018

NETO, F.B.G. OLIVEIRA, de P.G.A. COUTINHO, M.W.H. NOGUEIRA, M.F.M. RENDEIRO, G. **Caracterização energética de biomassas Amazônicas**. 6º Encontro de Energia no Meio Rural. São Paulo. 2006.

OBERNBERGER, I. THEK, GEROLD. **Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour**. Biomass and Bioenergy. v.27. pg.653-659. 2004.

OHMAN, M. BOMAN, C. HEDMAN, H. NORDIN, A. BOSTROM, D. **Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners**. Biomass and Bioenergy. v.27. pg.585–596. 2004.

PINTO, S.A.A. PEREIRA, C.L.B. CÂNDIDO, L.W. OLIVEIRA, C.A. CARNEIRO, O.C.A. CARVALHO, L.M.M.A. **Caracterização de pellets de ponteira de eucalipto**. Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science). v.6. n.3. p.232-236. 2015.

PIRRAGLIA, A., GONZALEZ, R., & SALONI, D. **Techno-economical analysis of wood pellets production for US Manufacturers**. BioResources, v.5, n°4, p.2374-2390, 2010.

PROTÁSIO, de P.T. TRUGILHO, F.P. SIQUEIRA, de F.H. MELO, de A.N.C.I. ANDRADE, R.C. GUIMARÃES, Jr. B.J. **Caracterização energética de pellets in natura e torreficados produzidos com madeira residual de Pinus**. Pesquisa Florestal Brasileira. v.35. n.84. p.435-442. 2015.

PROTÁSIO, T.P.; BUFALINO, L.; MENDES, R.F.; RIBEIRO, M.X.; TRUGILHO, P.F.; LEITE, E.R. **Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, 2012.

RENDEIRO, GONÇALO. NOGUEIRA, MANUEL. **Combustão e gaseificação da biomassa sólida soluções energéticas para a Amazônia**. Ministério de Energia. Brasília. Ed.1. pg.

RHÈN, C. GREF, R. SJOSTROM, M. WASTERLUND, I. **Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets**. Fuel Processing Technology. v.87. p.11-16. 2005.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO E INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA. **Florestas Nativas de Produção Brasileiras. (Relatório)**. Brasília, DF.2011.



SILVA, A.D. ALMEIDA, C.V. VIANA, C.L. KLOCK, U. MUÑIZ, B.I.G. **Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR.** Revista Floresta e Ambiente, v.21. n.4. pg.561-568. 2014.

SIQUEIRA, HUMBERTO FAULLER. **Efeito de aditivos na qualidade de pellets de madeira para uso energético.** 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

SOUZA, de M.M. SILVA, da A.D. ROCHADELLI, R. SANTOS, dos C.R. **Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*.** Revista Floresta. Curitiba, PR. v.42. n.2. p.325-334. 2012.

SOUZA, S.K. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos de madeira para produção de móveis.** Monografia apresentada a Universidade Estadual Paulista, Campus experimental Itapeva. pg.1-47. 2008.

SPANHOL, A. NONES, D.L. KUMABE, F.J.B. BRAND, M.A. **Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia.** Revista Floresta. V.45. n.4. pg.833-844. 2015.

STELTE, W. CLEMONS, C. HOLM, J.K. AHRENFELDT, J. HENRIKSEN, U.B. SANADI, A.R. **Fuel Pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass Transition and Surface Waxes on Pelletizing Properties.** BioEnergy Research, v.5(2). p.450–458. 2011a.

STELTE, W. HOLM, J.K. SANADI, A.R. BARSBERG, S. AHRENFELDT, J. HENRIKSEN, U.B. **A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources.** Biomass and Bioenergy, v.35(2). p.910–918. 2011b.

ŚWINIGÓN, J. LONGAUER, J. **Energy consumption in wood pellets production.** Folia Forestale Polonica. n.36. pg.77-83. 2005.

TELMO, C. & LOUSADA, J. **Heating values of wood pellets from different species.** Biomass and Bioenergy. v.35(7). p.2634–2639. 2011.

TOSCANO, G. RIVA, G. PEDRETTI, F.E. CORINALDESI, F. MENGARELLI, C. DUCA, D. **Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements.** Biomass and Bioenergy. v.56. p.317-322. 2013.

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

TUMULURU, S.J. **Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover.** Biosystems Engineering, v. 119, n. September, p. 44–57, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.11.012>>.

TUMULURU, S.J. SOKHANSANJ, S. LIM, J.C. BI, T. LAU, A. MELIN, S. SOWLATI, T. OVEISI, E. **Quality of wood pellets produced in British Columbia for export.** Applied Engineering in Agriculture. v.26(6). p.1013–1020. 2010.

VAN LOO, Sjaak; KOPPEJAN, Jaap. **The handbook of biomass combustion and co-firing.** Earthscan, 2012.

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