

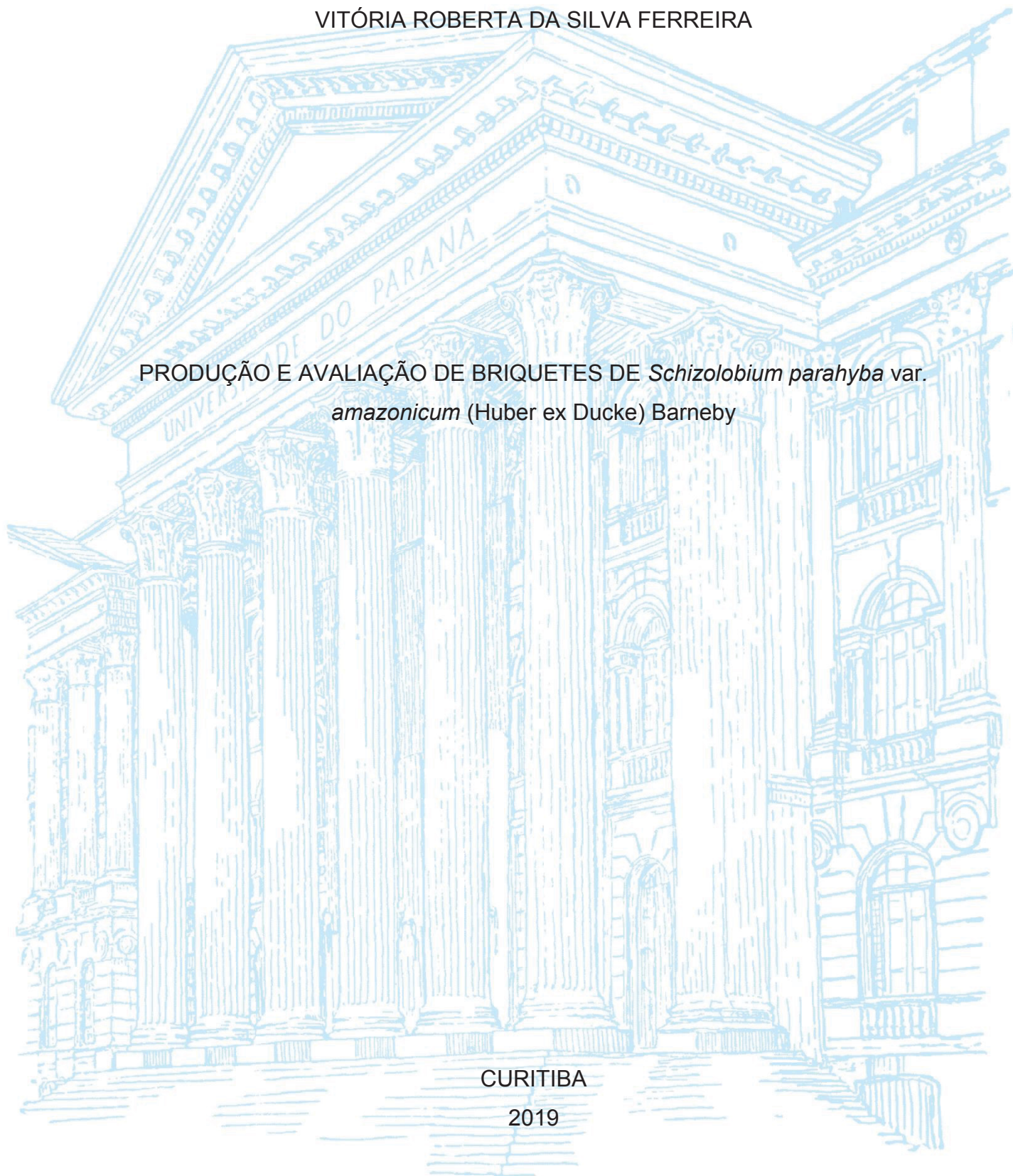
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VITÓRIA ROBERTA DA SILVA FERREIRA

PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BRIQUETES DE *Schizolobium parahyba* var.  
*amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby

CURITIBA

2019



VITÓRIA ROBERTA DA SILVA FERREIRA

PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BRIQUETES DE *Schizolobium parahyba* var.  
*amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr.: Dimas Agostinho da Silva

Coorientador: Dr.: Fernando Augusto Ferraz

Coorientador: Dr.: Edson Alves de Lima

CURITIBA

2019

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Ferreira, Vitória Roberta da Silva

Produção e avaliação de briquetes de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby / Vitória Roberta da Silva Ferreira. – Curitiba, 2019.

68 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientadores: Dr. Fernando Augusto Ferraz

Dr. Edson Alves de Lima

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 25/02/2019.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Briquetes. 2. Resíduos vegetais - Reaproveitamento. 3. Biomassa vegetal. 4. Biocombustíveis. 5. Teses. I. Silva, Dimas Agostinho da. II. Ferraz, Fernando Augusto. III. Lima, Edson Alves de. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.839.813

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160

## TERMO DE APROVAÇÃO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
FLORESTAL - 40001016015P0

### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **VITÓRIA ROBERTA DA SILVA FERREIRA** intitulada: **Produção e avaliação de briquetes de *Schizolobium parahyba var amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Fevereiro de 2019.

DIMAS AGOSTINHO DA SILVA  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

OSMAR JOSÉ ROMEIRO DE AGUIAR  
Avaliador Externo (UEPA)

PEDRO HENRIQUE GONZALEZ DE CADEMARTORI  
Avaliador Interno (UFPR)

À minha mãe Zelita, por ser meu porto seguro, por seu apoio durante essa  
jornada e amor incondicional dedicado a mim.

Dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro, agradeço a Deus pelo dom da vida, e por me dar força e coragem para encarar esse grande desafio.

À minha família, em especial meus sobrinhos (Wágner, Marlisson Jr, André, Ricardo e Ágatha), pelo carinho com a tia deles.

Ao meu orientador Dimas Agostinho da Silva pela confiança em meu trabalho.

Ao comitê de orientação, Dr. Edson Lima e Dr. Fernando Ferraz por aceitar contribuir para a realização desse trabalho.

À Embrapa Florestas, Laboratório de Energia de biomassa/UFPR e o Laboratório de microscopia/UFPR por disponibilizarem suas estruturas para o desenvolvimento da dissertação.

Ao Professor Osmar José Romeiro de Aguiar pela boa vontade em solicitar junto a empresa a matéria prima utilizada neste trabalho.

À empresa ADECO Indústria e Comercio de Compensados por ceder a matéria prima utilizada para elaboração deste trabalho.

Ao Professor e amigo Pedro Cademartori pela grande ajuda nesse trabalho, por sempre acreditar no meu trabalho e me motivar a continuar essa caminhada. Acredite, não tenho palavras para expressar tamanha gratidão por tudo que fizeste por mim.

Ao psicólogo Luiz Vieira e ao psiquiatra Dr. João Guilherme Borgio, ambos do Centro de atenção à saúde (CASA 4/UFPR) pela assistência e acompanhamento. Vocês foram de grande importância para concretização desse trabalho.

Aos meus amigos Laura, Raiana, Bruno, Jéssica, Diego e Lucas pelo companheirismo e amizade. Mesmo distante sempre se fizeram presentes.

Às minhas amigas Renata e Bruna. Meninas, vocês foram imprescindíveis no processo de adaptação em Curitiba, sem a sua ajuda tudo seria bem mais difícil.

Aos meus companheiros de laboratório Fernando, Sandra, Clarice e Rudson pelo apoio no decorrer da dissertação, pelas conversas aleatórias e momentos de descontração ao longo desses dois anos. Vocês são incríveis.

À minha amiga “mãe” (como ela mesma gosta de se intitular) Vivian “Sushi” Takahashi pela paciência e boa vontade para comigo. De fato, foste uma mãe durante

esse tempo. Obrigada por ter me acompanhado ao estádio mais bonito do Brasil, o estádio do meu tricolor paulista São Paulo Futebol Clube.

Às meninas do AP 21 pela convivência ao longo desses dois anos Helô, Júlia, Maria e principalmente Jaque e Mari que se tornaram amigas muito queridas. Nossas cantorias foram demais.

Ao professor Alexandre Behling pela ajuda com os dados estatísticos.

A Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

E aqueles que ajudaram direta ou indiretamente para realização desse trabalho.

Grata.

“Pois o Senhor é quem dá  
sabedoria; de sua boca procedem o  
conhecimento e o discernimento”.

(Provérbios 2:6)

## RESUMO

A indústria madeireira é caracterizada por produzir grandes quantidades de resíduos através do processo de beneficiamento da madeira. Esses resíduos, se depositados em locais inadequados, podem causar impactos ambientais irreversíveis. Diante desta problemática, o presente trabalho teve por objetivo produzir e avaliar briquetes de resíduos da indústria de lâminas da madeira de *Schizolobium parayba var. amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby no através de suas propriedades. Para tal, foi adotado um esquema fatorial que intercalava os parâmetros através de diferentes pressões (1000, 1300 e 1600 psi), temperaturas (100, 130 e 160°C) e granulometrias (40, 60 e 80 mesh). Foram produzidos briquetes de alburno e cerne da madeira. Foram realizadas análises das propriedades mecânicas, químicas e energéticas dos briquetes, visando caracterizar esse biocombustível. A microscopia eletrônica de varredura mostrou que briquetes submetidos a maiores temperaturas, as partículas apresentaram-se mais próximas, menor quantidades de espaços vazios e conseqüentemente, apresentaram maior resistência a compressão e menor incidência de finos. Com relação a caracterização energética, os briquetes de cerne apresentaram maior poder calorífico, porém, a análise química imediata, com exceção das cinzas, os briquetes de cerne e alburno os resultados foram semelhantes. A análise de agrupamento mostrou que a temperatura foi a variável que mais influenciou nas propriedades de briquetes.

**Palavras-chave:** Biomassa florestal. Biocombustível. Propriedades energéticas. Adensamento. Reaproveitamento de resíduos.

## ABSTRACT

The timber industry is characterized by producing large amounts of waste through wood processing. Such waste can cause irreversible environmental impacts, if deposited in unsuitable places. In view of this problem, the aim of this study was to investigate the potential of waste briquettes in the industry of *Schizolobium parayba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby through their properties. A factorial methodology was used to intercalate the parameters through different pressures (1000, 1300 and 1600 psi), temperatures (100, 130 and 160 °C) and grain sizes (40, 60 and 80 mesh). Sapwood and heartwood briquettes were produced. Analysis of the mechanical, chemical, thermal energy and morphological properties of the briquettes were carried out, in order to characterize this biofuel. Through Scanning Electron Microscopy it was observed that in briquettes submitted to higher temperatures, the particles were closer, there were smaller amount of empty holes, and, consequentially higher compressive strength e less occurrence of fines. Regarding to energetic characterization, wood core briquettes showed higher calorific power although the immediate chemical analysis, except the ashes, demonstrated different results for sapwood and wood core briquettes. By grouping/clustering analysis it was possible to observe that the variable that directly influenced the characteristics of the briquettes was temperature.

**Keywords:** Forest biomass. Biofuel. Energetic properties. Densification. Reuse of waste.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 - PROCESSO DE CONFECÇÃO DOS BRIQUETES NAS DEPENDÊNCIAS DA EMBRAPA FLORESTAS EM COLOMBO, PR .....  | 26 |
| FIGURA 2 - MENSURAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DA ALTURA E DO DIÂMETRO DE SCHIZOLOBIUM PARAHYBA .....   | 30 |
| FIGURA 3 - CORPO-DE-PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE COMPRESSÃO ....   | 32 |
| FIGURA 4 - A) ENSAIO DE DURABILIDADE AO ATRITO DAS LATERAIS DOS BRIQUETES; (B) ENSAIO DE DURABILIDADE AO ATRITO DA FACE DOS BRIQUETES.....             | 33 |
| FIGURA 5 - DIFERENTES ETAPAS PARA DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DOS BRIQUETES E DA MADEIRA DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> .....            | 35 |
| FIGURA 6 - ANÁLISE MECÂNICO DINÂMICO MOSTRANDO A TEMPERATURA QUE OCORRE A TRANSIÇÃO VÍTREA DA LIGNINA NA MADEIRA DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> ..... | 39 |
| FIGURA 7 - TERMOGRAVIMETRIA DE MADEIRA <i>IN NATURA</i> E BRIQUETES DE CERNE E ALBURNO DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> .....                           | 40 |
| FIGURA 8 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE AGRUPAMENTO PARA BRIQUETES DE ALBURNO DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> .....  | 49 |
| FIGURA 9 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE AGRUPAMENTO PARA BRIQUETES DE CERNE DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> .....  | 51 |
| FIGURA 10 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS BRIQUETES DE ALBURNO PRODUZIDOS A 100 °C.....  | 52 |
| FIGURA 11 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS BRIQUETES DE ALBURNO PRODUZIDOS A 160 °C.....  | 52 |
| FIGURA 12 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS BRIQUETES DE CERNE PRODUZIDOS A 100 °C .....   | 53 |
| FIGURA 13 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS BRIQUETES DE CERNE PRODUZIDOS A 160 °C .....   | 54 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1 - ESQUEMA FATORIAL UTILIZADO PARA DETERMINAR PRESSÃO, TEMPERATURA E GRANULOMETRIA NA PRODUÇÃO DOS BRIQUETES.....                                     | 26 |
| TABELA 2 - UMIDADE E ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> .....   | 37 |
| TABELA 3 - TEOR DE VOLÁTEIS, CINZAS E CARBONO FIXO DE ALBURNO E CERNE PARA MADEIRA <i>IN NATURA</i> E PARA OS BRIQUETES DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> ..... | 42 |
| TABELA 4 - PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA <i>IN NATURA</i> E DOS BRIQUETES DE ALBURNO E CERNE DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> .....                     | 45 |
| TABELA 5 - DENSIDADE APARENTE, TAXA DE RETORNO EM VOLUME E PERDA DE MASSA INERENTE AO PROCESSO PARA OS BRIQUETES DE ALBURNO .....                             | 48 |
| TABELA 6 - DENSIDADE APARENTE, TAXA DE RETORNO EM VOLUME E PERDA DE MASSA INERENTE AO PROCESSO PARA BRIQUETES DE CERNE .....                                  | 50 |
| TABELA 7 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE ALBURNO E CERNE DOS BRIQUETES DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> ...                           | 57 |
| TABELA 8 - DURABILIDADE MECÂNICA DE BRIQUETES DE ALBURNO E CERNE DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> .....  | 59 |

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

AQI – Análise Química Imediata

C - Carbono

CF – Carbono fixo

Cm<sup>3</sup> – centímetro cúbico

Di – Dimensão inicial

Df – Dimensão final

Dm – Durabilidade mecânica

DMA – Análise mecânico dinâmica

E. T – Extrativos Totais

H – Hidrogênio

Ho – Holocelulose

Kcal/kg – Quilocaloria por quilograma

LI – Lignina Insolúvel

LS – Lignina Solúvel

LT – Lignina Total

M.a.s.final – Massa absolutamente seca final

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

Um - Massa úmida

Ms - Massa seca

Mspm – Massa seca pós mufla

N - Nitrogênio

NBR – Norma Brasileira

O - Oxigênio

PAC – Peso da amostra com cadinho

PAS – Peso absolutamente seco

PC – Peso do cadinho

PCS - Poder calorífico superior

Pm – Perda de massa

TCZ – Teor de cinzas

TGA – Análise Termogravimétrica

TR – Taxa de retorno

TV – Teor de voláteis

U - Umidade

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....   | <b>18</b> |
| 2.1 GERAL .....  | 18        |
| 2.2 ESPECÍFICOS .....  | 18        |
| <b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....   | <b>19</b> |
| 3.1 SCHIZOLOBIUM PARAHYBA VAR. AMAZONICUM (HUBER EX DUCKE)<br>BARNEBY – PARICÁ ..... | 19        |
| 3.2 CERNE E ALBURNO .....  | 20        |
| 3.3 BRIQUETAGEM .....  | 21        |
| 3.4 BRIQUETES .....  | 22        |
| 3.5 INOVAÇÕES PARA BRIQUETAGEM .....   | 23        |
| <b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | <b>25</b> |
| 4.1 COLETA E PREPARAÇÃO DO MATERIAL .....  | 25        |
| 4.2 PRODUÇÃO DOS BRIQUETES .....   | 25        |
| 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DOS BRIQUETES.....                                   | 27        |
| 4.3.1 Madeira.....   | 27        |
| 4.3.1.1 Teor de umidade.....   | 27        |
| 4.3.1.2 Extrativos totais. ....  | 27        |
| 4.3.1.3 Teor de Lignina Insolúvel (Klason) .....                                     | 28        |
| 4.3.1.4 Lignina solúvel .....  | 28        |
| 4.3.1.5 Teor de Holocelulose.....  | 29        |
| 4.3.1.6 Análise mecânico dinâmica (DMA).....   | 29        |
| 4.3.2 Briquetes .....  | 30        |
| 4.3.2.1 Perda de massa inerente ao processo. ....                                    | 30        |
| 4.3.2.2 Taxa de retorno em volume.....   | 30        |
| 4.3.2.3 Densidade Aparente .....   | 31        |
| 4.3.2.4 Resistência a Compressão.....  | 31        |
| 4.3.2.5 Durabilidade Mecânica ao Atrito .....  | 32        |
| 4.3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....                               | 33        |
| 4.3.3 Análises realizadas tanto em Madeira como em Briquetes .....                   | 33        |
| 4.3.3.1 Análise termogravimétrica (TGA).....   | 33        |
| 4.3.3.2 Poder Calorífico Superior (PCS).....   | 34        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.3.3.3 Análise Química Imediata (AQI) .....  | 34        |
| 4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA. ....   | 36        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>37</b> |
| 5.1 UMIDADE E ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA .....  | 37        |
| 5.2 ANÁLISE MECÂNICA DINÂMICA – DMA .....   | 38        |
| 5.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA .....   | 40        |
| 5.4 ANÁLISE ENERGÉTICA DOS BRIQUETES E DA MADEIRA DE <i>SCHIZOLOBIUM<br/>PARAHYBA</i> .....             | 41        |
| 5.5 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO PARA TAXA DE RETORNO EM VOLUME,<br>PERDA DE MASSA E DENSIDADE APARENTE ..... | 48        |
| 5.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....  | 51        |
| 5.7 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E DURABILIDADE MECÂNICA AO ATRITO  | 56        |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>   | <b>60</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>61</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria madeireira é caracterizada pela grande quantidade de resíduos que produz nos processos de desdobro. Estima-se que do volume total de uma tora seja aproveitado apenas cerca de 40% a 60%. Isso significa que a cada 10 árvores cortadas, em média apenas cinco são aproveitadas comercialmente (CERQUEIRA *et al.*, 2012). Por conseguinte, é importante ressaltar que o tipo de resíduo gerado no desdobro é caracterizado pela heterogeneidade do material. Segundo relatório do IBÁ (2017), o setor florestal gerou 47,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo que desse total 33,7 milhões, cerca de 70, foram gerados pelas atividades florestais e 14,1 milhões (aproximadamente 30%) pelas indústrias.

Assim, conhecer a contribuição de determinadas partes da madeira como o cerne e o alburno se faz necessário e de grande importância, pois quanto maior a proporção destes, melhor será para escolher a finalidade mais apropriada para a madeira (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Segundo Pereira *et al.* (2013), a madeira de cerne por possuir uma coloração mais escura e propriedades específicas, apresenta maior valor tecnológico para usos em serraria, sendo o contrário para o alburno, que por ser mais higroscópico, menos resistente a degradação biológica e resistência mecânica não tem uma finalidade estabelecida se não a para geração de energia. No entanto, para Pereira *et al.* (2013) são incipientes os estudos referentes à influência do cerne e alburno na qualidade do carvão vegetal. Nesse contexto, observa-se situação similar para o setor de produtos energéticos adensados, especialmente os briquetes.

Atualmente, existem alternativas que visam aproveitar todo esse resíduo como a geração de energia, por exemplo, e assim contribuir para a racionalização do uso dos recursos florestais, proporcionando uma nova alternativa socioeconômica às empresas, tornando-as ambientalmente adequadas ao gerenciamento de resíduos industriais (STADLER *et al.*, 2009).

Nisto, cita-se a indústria de lâminas de madeira, que no contexto econômico do Brasil, certamente, é de grande importância, devido à enorme disponibilidade de recursos florestais e assim como os demais processos de beneficiamento da madeira, gera grandes quantidades de resíduos. Dentre os produtos advindos da indústria de laminação, estão os laminados para piso de revestimento, produção de móveis, além de painéis de madeira, como o compensado, por exemplo. Este último por sua vez, apresentou um crescimento na produção total de cerca de 3,8% de compensados

oriundo de árvores plantadas no ano de 2016 e alcançou 2,7 milhões de m<sup>3</sup>, sendo que 1,8 milhão foi destinado à exportação (IBÁ, 2017).

Em paralelo, cita-se a espécie *Schizolobium parahyba var. amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby que por possuir baixa densidade (0,40g/cm<sup>3</sup>), fuste reto e rápido crescimento, comparada a outras espécies nativas, vem sendo amplamente utilizada no estado do Pará para produção de lâminas de madeira e que certamente, assim como outros setores madeireiros, origina uma grande quantidade de resíduos no momento do desdobro (ANDRADE *et al.*, 2017). Esses resíduos, se despejados em locais impróprios, poderão ocasionar os mais diversos problemas, a citar o risco de incêndios que esses materiais trazem consigo.

Por outro lado, existe a necessidade de alguns setores industriais gerarem energia renovável e limpa para manter o seu funcionamento. Nesse contexto, destaca-se a briquetagem, que consiste na compactação dos resíduos por meio de ações mecânicas, sob elevada pressão e temperatura, aumentando suas propriedades energéticas. De acordo com Paula (2017), a qualidade final dos briquetes dependerá de parâmetros como umidade do material a ser compactado, a granulometria das partículas, além da temperatura e pressão durante o processo.

Dessa forma, a produção de briquetes pode ser uma opção viável para minimizar os problemas sofridos pelo ambiente causados pelo acelerado crescimento das atividades humanas, além de ser uma forma de reutilização dos resíduos utilizados, gerando renda para a indústria, redução do volume de resíduos estacionados no pátio da serraria, poder calorífico superior à lenha, além de diminuir o custo de transporte, auxiliando assim na preservação da natureza e na economia de energia (PAULA, 2006; GONÇALVES *et al.*, 2009).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

Produzir e avaliar os briquetes de *Schizolobium parayba var. amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (Paricá).

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Investigar a influência de cerne e alburno nas propriedades dos briquetes;
- Analisar os efeitos da temperatura, pressão e granulometria na morfologia dos briquetes em diferentes condições de processo de briquetagem;
- Investigar as diferentes temperaturas, pressões e granulometria nas propriedades mecânicas, químicas e energéticas dos briquetes.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 SCHIZOLOBIUM PARAHYBA VAR. AMAZONICUM (HUBER EX DUCKE) BARNEBY – PARICÁ

De acordo com Carvalho (1994), o Paricá é uma espécie pertencente à família Leguminosae- Ceasalpinoideae, ocorre em toda região da Floresta Amazônica, é uma espécie pioneira, de grande porte e sua ocorrência se dá em áreas de várzea e terra firme, em solos argilosos e altitudes de até 800 m. É uma espécie hermafrodita e possui ramificação cimosa com copa ampla e umbeliforme. O tronco é reto e cilíndrico podendo apresentar sapopemas. Quando jovem, a casca é esverdeada e delgada, espessa, dura, rugosa, possuindo um odor desagradável (SOUSA *et al.*, 2003).

A madeira pode ser considerada leve, com peso úmido de 650 kg/m e peso específico básico a 12% de umidade variando entre 320 e 400 kg/m<sup>3</sup> (ROSSI *et al.*, 2001). A cor é descrita tanto como branco-palha ou amarelo-pálido com manchas amareladas e rosadas, em alguns casos pode ocorrer certa dificuldade na distinção entre o alburno e o cerne. O desenho é pouco definido, com linhas verticais, faixas largas irregulares de coloração mais escura. A superfície é plana, sedosa e irregularmente lustrosa, a textura varia de média a grossa, uniforme, grã irregular e reversa. A madeira maciça tem facilidade em ser serrada, devido à baixa densidade. Durante a secagem pode ocorrer deformações e rachaduras leves. De fácil trabalhabilidade e o uso de pregos e parafusos é limitado em virtude da baixa capacidade de fixação.

A durabilidade natural é baixa com baixa resistência ao ataque de fungos, cupins e insetos de madeira seca (CARVALHO, 1994). A madeira pode ser aplicada as mais diversas utilidades como a fabricação de brinquedos, saltos para calçados, embalagens leves, aerodelismo, pranchetas, caixotaria leve e pesada, embalagens de frutas, obras civis internas como forros e tabuados, palitos de fósforo, lápis e chapas de compensado, dentre outros. Outra finalidade é a aplicação em canoas feitas de tronco da madeira, (REITZ *et al.*, 1983).

O tamanho das fibras pode variar entre 1,10 e 1,59 mm, podendo ser indicado para fabricação de polpa e papel de fibra curta. Embora o teor de lignina seja alto (35%), pode ser facilmente deslignificada, é de fácil branqueamento e produz papel

com ótima resistência. Apesar disso, de acordo com estudos de Pereira *et al.* (1982), esse aproveitamento não existe, já que a produção de papel no país é obtida a partir de celulose de espécies exóticas em reflorestamentos industriais (*Eucalyptus* e *Pinus*).

Atualmente, a madeira do Paricá vem sendo muito utilizada para a produção de compensados e laminados, tanto na parte interna (miolo), quanto parte externa (capa). Devido ao seu valor comercial e ao seu crescimento rápido, a espécie vem sendo cotada como de grande importância para o reflorestamento (PEREIRA *et al.*, 1982; ROSA, 2001).

### 3.2 CERNE E ALBURNO

Burger e Richter (1991) afirmam que o percentual de alburno (também denominado de xilema) e cerne podem variar dentro da própria espécie, idade, sítio, solo além do clima. Segundo Silva e Trugilho (2003), o cerne apresenta diferenças acentuadas comparada ao alburno, dentre elas: o cerne possui maior quantidade de composto fenólicos e ácidos e menos amido que o alburno, a lignina presente no cerne apresenta maior peso molecular, além de ser mais condensada. O cerne apresenta menor teor de umidade, além de ser mais resistente e impermeável comparado ao alburno (BURGER; RICHTER, 1991).

Para Miller (1999), a proporção de alburno pode variar em espessura e número de anéis de crescimento com 4 a 6 cm de espessura radial. No entanto, o mesmo autor afirma que esse valor pode exceder a 15 cm de espessura radial.

Para o cerne, de acordo com Burger e Richter (1991), a formação se dá através do crescimento das árvores, conseqüentemente, ocorre um distanciamento do câmbio, acarretando em uma perda gradativa de sua atividade vital, adquirindo coloração mais escura em decorrência da deposição de taninos, resinas, gorduras, carboidratos e demais substâncias advindos da transformação dos materiais de reserva presentes nas células parenquimáticas do alburno interno.

Estudos comprovam que investigar separadamente essas duas estruturas se mostram de grande importância, pois mostram resultados diferentes, o que permite fazer o melhor uso tanto do cerne quanto do alburno. Fonte *et al.* (2017), em seu estudo sobre propriedades físicas e mecânicas de cerne e alburno de *Cryptomeria japonica* concluíram que a madeira de cerne apresenta valores médios superiores

para as propriedades químicas, enquanto que a madeira de alburno se apresentou mais estável que a madeira do cerne. Já Costa *et al.* (2017), analisando as propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis* verificaram que maiores valores médios de densidade básica, fração da parede, largura e espessura da parede das fibras estão associadas a madeira de alburno; o cerne, no entanto, possui maiores valores médios de diâmetro do lume das fibras e teores de lignina e extrativos. Andrade *et al.* (2017), analisando a influência de cerne e alburno na densidade básica de *Schizolonium parahyba var. amazonicum* concluíram que a densidade básica da madeira de cerne é significativamente maior que o alburno. Porém, Silva *et al.* (2013), em seu estudo sobre a caracterização tecnológica de *Schizolobium amazonicum* encontraram valores de densidade básica do alburno superior ao cerne com 0,38 g cm<sup>3</sup> e 0,30 g cm<sup>3</sup>, respectivamente. O mesmo aconteceu para o teor de extrativos totais com 5,71% para o alburno e 4,90% para o cerne. Já o percentual de lignina klason para o cerne foi maior com 25,28%, enquanto que para o alburno o valor encontrado foi de 23,21%.

### 3.3 BRIQUETAGEM

A briquetagem é um processo físico que consiste na compactação do resíduo na forma de cilindros ou retângulos, por meio da geração mecânica de elevadas pressões e temperaturas, com ou sem adição de ligantes, com o objetivo de aumentar sua densidade, facilitando seu transporte, armazenamento e otimizando as características energéticas dos resíduos (QUIRINO; BRITO, 1991).

Segundo Fontes *et al.* (1984), através do processo de briquetagem, é possível obter um combustível com homogeneidade granulométrica, maior densidade e resistência a geração de finos no manuseio de transporte. O aumento da densidade proporcionado pelo processo de compactação é capaz de produzir um combustível com maior concentração energética por unidade de volume. Desse modo, com a resistência adquirida pelo material tem-se uma viabilidade técnica e econômica para o transporte em maiores distâncias.

Vale e Gentil (2008) afirmaram que em comparação com a lenha, seu principal concorrente, o briquete possui maior densidade energética, maior rapidez na geração de temperatura e calor, proporciona redução nos custos de transporte, menos custo de manuseio e maior apelo ambiental por ser produzido a partir de resíduos.

Quando são comparados os poderes caloríficos de lenha e briquete, tem-se que 1m<sup>3</sup> de briquete é cinco vezes mais energético do que 1 st de lenha (QUIRINO; BRITO, 1991; CAPOTE, 2012). Em relação a densidade energética, Quirino (2012) afirma que a densidade dos briquetes é três vezes superior se comparado com a lenha.

No entanto, para se obter um biocombustível de alta qualidade, é necessário seguir alguns parâmetros como o teor de umidade da madeira antes do processo de briquetagem, temperatura utilizada e pressão exercida durante a briquetagem. De acordo com Quirino (1991) e Lucena *et al.* (2008), o teor de umidade para produção dos briquetes deve variar entre 10 a 12%. Já Silva *et al.* (2017) afirmam que para produção de briquetes de resíduos de Pinus, o teor de umidade da matéria-prima a 15% é considerado o ideal. Com relação à pressão, Filippetto (2008) afirma que a densidade final do produto depende da pressão aplicada durante a compactação. Brand *et al.* (2009) conclui que quanto maior a pressão exercida no momento da briquetagem, menor é o teor de umidade e maior é a massa específica dos briquetes. Para a temperatura, com a elevação desta, ocorre a “plastificação” da lignina, que atua como ligante natural nas partículas de madeira (PAULA, 2010).

### 3.4 BRIQUETES

A indústria madeireira tem como característica a grande quantidade de resíduos advindo do beneficiamento e industrialização da madeira. Por sua vez, nem sempre esses resíduos têm destinação adequada, podendo ocasionar diversos problemas, dentre os quais a poluição ambiental e custos de descarte. Dessa forma, os briquetes surgiram como uma alternativa visando utilizar esses resíduos de maneira sustentável e agregando valor aos resíduos da madeira (FURTADO *et al.*, 2010).

O termo briquete começou a ser difundido em Paris, França. William Easby patenteou o método que convertia finos de carvão em torrões sólidos utilizando altas pressões. Atualmente, os briquetes são utilizados principalmente em fornos de pizzaria, padarias, hotelaria etc (QUIRINO *et al.*, 2012).

De acordo com Silva *et al.* (2017), o briquete, também conhecido como lenha ecológica, é uma fonte concentrada e comprimida de material energético, substituindo com eficácia o GLP (gás liquefeito de petróleo), a energia elétrica, o carvão vegetal e

mineral, além da lenha. Segundo Paula (2010), os briquetes possuem constituição homogênea, resultando em uma queima uniforme, possuem fácil manuseio e transporte, baixa umidade, além do aumento do poder calorífico em virtude da maior densidade apresentada pelo biocombustível. Ainda, o autor afirma que existem briquetes oriundos dos mais diversos tipos de matéria-prima como os resíduos agrícolas (casca de arroz, feijão, soja, bagaço de cana, dentre outros).

Também é possível produzir briquetes a partir de finos de carvão vegetal, entretanto, nesse caso, é necessário o uso de aglutinantes para unir as partículas, tendo em vista que a lignina – aglutinante natural presente na madeira - foi degradada no processo de carbonização (PIMENTA *et al.*, 2015).

### 3.5 INOVAÇÕES PARA BRIQUETAGEM

Com o objetivo de melhorar as propriedades dos briquetes, algumas inovações estão sendo realizadas. Algumas pesquisas visam à adição de aglutinantes em briquetes de materiais lignocelulósicos e carvão vegetal.

Avelar (2012) adicionou lodo biológico e resíduos de algodão advindos da indústria têxtil em briquetes de pinus. Rodrigues *et al.* (2017) utilizaram finos de carvão e glicerina bruta para produção de briquetes e como aglutinante amido de milho industrial não refinado. Gouvêa *et al.* (2017) adicionaram lignina *kraft* em briquetes com resíduos da indústria moveleira visando analisar as propriedades mecânicas. Fernandez *et al.* (2018) adicionaram amido de milho em briquetes produzidos com bagaço de cana-de-açúcar. Paula (2010) produziu briquetes com diferentes tipos de resíduos agrícolas, a citar, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho entre outros.

Outra inovação trata-se da torreficação de briquetes, técnica que consiste em submeter os briquetes a elevadas temperaturas visando aumentar suas características energéticas. Partindo desse princípio, Protásio *et al.* (2012) verificaram a influência da torrefação e carbonização em briquetes de resíduos do processamento de grão de café a uma temperatura de 250°C. Enquanto Costa *et al.* (2015) verificaram a influência da torrefação em briquetes de *Eucalyptus* sp a diferentes temperaturas, 180, 220 e 260 °C. Já Felfli *et al.* (2004) verificaram a viabilidade técnico-econômica de briquetes torreficados e sua perspectiva no mercado brasileiro.

Outro produto que possui princípios de produção semelhante aos briquetes, pois trata-se de um material adensado é o *pellet*. Atualmente, são crescentes os estudos relacionados a esse biocombustível. Assim como nos briquetes, aglutinantes também têm sido utilizados. Siqueira (2017) acrescentou amido de trigo e amido de milho, além da lignina *kraft* e pellets de madeira. Pinto *et al.* (2015) caracterizaram pellets produzidos com ponteira de eucalipto. Ferreira (2017) estudou a viabilidade de pellets produzidos com resíduos da madeira da espécie *Dinizia excelsa* e *Manilkara elata*. Protásio *et al.* (2015) realizaram a caracterização energética de pellets *in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de Pinus.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 COLETA E PREPARAÇÃO DO MATERIAL

Foram coletadas lâminas comerciais de alburno (conhecida comercialmente por **capa**) e cerne (denominado comercialmente por **miolo**) de *Schizolobium parahyba*, cedidas pela empresa ADECO indústria e comércio de compensados, localizada no município de Dom Eliseu (Latitude 04°17'06" sul e Longitude 47°30'18" oeste), sudeste do estado do Pará. Segundo informações fornecidas pela empresa, o método de confecção das lâminas foi por torneamento.

As lâminas possuíam dimensões 1,0 x 1,0 m (comprimento x largura) e espessuras variando entre 2,05 a 4,0 mm e foram selecionadas para os ensaios em função da menor incidência de defeitos, especialmente nó e possíveis áreas com fungos. Na primeira etapa, as lâminas foram picadas e, posteriormente moídas utilizando um moinho martelo, e subsequentemente estas foram novamente submetidas ao moinho, desta vez utilizando uma peneira de menor granulometria. A segunda etapa foi realizada para ajustar a granulometria pretendida para as partículas. Após a etapa de moagem, as partículas foram classificadas para a obtenção de partículas com granulometria de 40, 60 e 80 *mesh* por meio de um sistema de peneiras. Por fim, as partículas foram mantidas em câmara climática com temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de  $\pm 65\%$  até atingirem o teor de umidade de equilíbrio, em torno de 12%.

### 4.2 PRODUÇÃO DOS BRIQUETES

A confecção dos briquetes ocorreu na Embrapa Florestas – Colombo, PR. A produção dos briquetes foi realizada em uma briquetadeira da marca Lippel, modelo BLB 32, podendo controlar a temperatura e o pistão da prensa. Foram adotadas como condições de processo três temperaturas (100, 130 e 160 °C), três pressões (1000, 1300 e 1600 psi), além de três granulometrias (40, 60 e 80 *mesh*), conforme detalhado no esquema fatorial da Tabela 1.

TABELA 1 - ESQUEMA FATORIAL UTILIZADO PARA DETERMINAR PRESSÃO, TEMPERATURA E GRANULOMETRIA NA PRODUÇÃO DOS BRIQUETES

| Tratamento         | Pressão (PSI) | Temperatura (°C) | Granulometria (mesh) |
|--------------------|---------------|------------------|----------------------|
| 1. (P1000T100G60)  | -1 (1000)     | -1 (100)         | 0 (60)               |
| 2. (P1600T100G60)  | 1 (1600)      | -1 (100)         | 0 (60)               |
| 3. (P1000T160G60)  | -1 (1000)     | 1 (160)          | 0 (60)               |
| 4. (P1600T160G60)  | 1 (1600)      | 1 (160)          | 0 (60)               |
| 5. (P1000T130G40)  | -1 (1000)     | 0 (130)          | -1 (40)              |
| 6. (P1600T130G40)  | 1 (1600)      | 0 (130)          | -1 (40)              |
| 7. (P1000T130G80)  | -1 (1000)     | 0 (130)          | 1 (80)               |
| 8. (P1600T130G80)  | 1 (1600)      | 0 (130)          | 1 (80)               |
| 9. (P1000T100G40)  | -1 (1000)     | -1 (100)         | -1 (40)              |
| 10. (P1300T160G40) | 0 (1300)      | 1 (160)          | -1 (40)              |
| 11. (P1300T100G80) | 0 (1300)      | -1 (100)         | 1 (80)               |
| 12. (P1300T160G80) | 0 (1300)      | 1 (160)          | 1 (80)               |
| 13. (P1300T130G60) | 0 (1300)      | 0 (130)          | 0 (60)               |

LEGENDA: P – pressão; T – temperatura; G – granulometria.

O tempo de briquetagem foi fixado em 5 minutos, com um período de resfriamento de 10 minutos. Para a produção individual dos briquetes foram utilizadas 20g de partículas de *Schizolobium parahyba*. Para cada tratamento foram confeccionados 8 briquetes, totalizando 102 briquetes de cerne e 102 de alburno, sendo que estes apresentavam dimensões próximas a 2 x 3 cm (altura x diâmetro) (FIGURA 1).

FIGURA 1 - PROCESSO DE CONFEÇÃO DOS BRIQUETES NAS DEPENDÊNCIAS DA EMBRAPA FLORESTAS EM COLOMBO, PR



FONTE: O autor, 2018.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DOS BRIQUETES

#### 4.3.1 Madeira

##### 4.3.1.1 Teor de umidade.

Foi determinada a umidade do material na base úmida antes da briquetagem através da norma ABNT NBR 1429/2017. Primeiro foi mensurada a massa antes de ser colocada em estufa a  $\pm 103^{\circ}\text{C}$  e foi mensurada novamente após 24h. Conforme a Equação 1:

$$U(\%) = \left( \frac{Mu - Ms}{Mu} \right) * 100$$

LEGENDA: U (%) Umidade; Mu: Massa úmida; Ms: Massa seca.

##### 4.3.1.2 Extrativos totais.

Foi determinado o teor de extrativos totais da madeira *in natura* de alburno e cerne por meio da norma ABNT NBR 14853/2010. O material foi colocado em estufa com temperatura de  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Foi utilizado 1g do material para cada análise, sendo colocados no extrator tipo soxhlet com 250ml de etanol-tolueno com proporção 1:2, ou seja, 166 ml de tolueno e 83 ml de etanol durante 8 horas. Seguidamente, foram submetidos novamente a extração com 250 ml de etanol durante o período de 6 horas. Finalizado essa etapa, as amostras foram colocadas em erlenmeyers acrescentando 100 ml de água destilada e colocada em banho-maria durante 2 horas. Após essa etapa, as amostras foram filtradas utilizando cadinhos filtrantes com peso previamente mensurado, colocadas em estufa com temperatura  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. A determinação do teor de extrativos totais foi realizada por meio da Equação 2:

$$E.T = \left( pas - \frac{pac - pc}{pas} \right) x 100 \quad (2)$$

LEGENDA: pas: peso absolutamente seco; pac: peso da amostra com cadinho; pc: peso do cadinho.

#### 4.3.1.3 Teor de Lignina Insolúvel (Klason)

O teor de lignina Klason foi determinado por meio da norma ABNT NBR 7989/2010. Para tal, foram colocados 0,200g de material previamente extraído (item 4.3.1.2) em Erlenmeyer adicionando 3 ml de ácido sulfúrico a 70% ficando por duas horas em temperatura ambiente. Posteriormente foi adicionado 84 ml de água destilada quente. Em seguida, foram colocadas no banho-maria por um período de 4 horas. Após o conteúdo foi filtrado utilizando cadinhos filtrantes devidamente tarados acrescentando 700 ml de água destilada quente. Em sequência, foram colocados em estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para secagem e posteriormente a obtenção do peso seco. O teor de lignina insolúvel foi determinado através da Equação 3:

$$LI(\%) = \left[ \frac{M.a.sFinal}{\frac{0,3}{1 - \frac{E.T}{100}}} \right] \quad (3)$$

LEGENDA: LI (%): Lignina insolúvel; M.a.s. Final: Massa absolutamente seca final; E.T: Extrativos Totais.

#### 4.3.1.4 Lignina solúvel

Para determinação da lignina solúvel foi seguido as diretrizes da ABNT NBR 16550/2018. O volume do líquido extraído do processo de lignina insolúvel foi completado com água destilada até atingir 1000 ml. Para a mensuração do teor de lignina solúvel, utilizou-se um espectrofotômetro Shimadzu, modelo UV-1800. O procedimento é baseado na absorção de luz nos comprimentos de onda de 215 e 280 nm. Para determinação da lignina solúvel, fez-se uso da Equação 4. Por meio da obtenção de lignina solúvel e insolúvel, foi possível estimar o teor de lignina total, conforme a Equação 5:

$$L.S(\%) = \left[ \frac{4.53 \times L215 - L280}{300 \times \left( \frac{0,3}{1 - \frac{E.T}{100}} \right)} \right] \times 100 \quad (4)$$

LEGENDA: L.S (%): Lignina solúvel; E.T: Extrativos Totais.

$$L.T. (\%) = L.I. (\%) + L.S. (\%) \quad (5)$$

LEGENDA: L. I (%) Lignina Insolúvel; L.S. (%): Lignina solúvel

#### 4.3.1.5 Teor de Holocelulose

O teor de holocelulose foi obtido pela diferença entre a porcentagem de lignina total e o teor de extrativos totais, de acordo com a equação 6:

$$Ho(\%) = (100 - L.T(\%) - E.T(\%)) \quad (6)$$

LEGENDA: Ho: Holocelulose; L.T: Lignina Total; E. T(%): Extrativos Totais

#### 4.3.1.6 Análise mecânico dinâmica (DMA)

A análise de DMA foi utilizada para determinar a temperatura de transição vítrea da lignina presente na madeira do cerne de *S. parahyba* com teor de umidade médio de 9 e 30%. Foi utilizado o equipamento TA DMA Q800 do laboratório de Tecnologia da Madeira da Embrapa Florestas. O equipamento foi configurado para operação com frequência de 1Hz e taxa de aquecimento de 5°C/min. Amostras de *S. parahyba* com dimensões de 60x13x20 mm foram expostas a cargas cíclicas entre 30 e 300°C.

A análise de DMA em madeira de alburno foi realizada, mas devido não suportar a carga aplicada e tendo o rompimento da madeira, não foi possível gerar os dados.

### 4.3.2 Briquetes

#### 4.3.2.1 Perda de massa inerente ao processo.

Considerando a repetição de 8 unidades de briquetes por tratamento, foi mensurada a massa inicial (20g) de material antes de confeccionar os briquetes. Posteriormente, após a briquetagem, a massa foi mensurada novamente utilizando uma balança analítica com precisão de 0,001g. A diferença entre a massa inicial e massa final determinou a perda de massa (Equação 7).

$$PM(\%) = \left( \frac{Mi - Mf}{Mi} \right) * 100 \quad (7)$$

LEGENDA: PM (%): Perda de Massa; Mi: Massa inicial; Mf: Massa final

#### 4.3.2.2 Taxa de retorno em volume

Após a briquetagem, imediatamente foram medidas as dimensões dos briquetes, tanto comprimento, quanto diâmetro observado oito repetições por tratamento (FIGURA 2).

FIGURA 2 - MENSURAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DA ALTURA E DO DIÂMETRO DE SCHIZOLOBIUM PARAHYBA



(A)



(B)

FONTE: O autor (2018).

Posteriormente, os briquetes foram alocados em sala de aclimação a 23°C e 65% de umidade relativa. Após 24 horas, as dimensões foram novamente mensuradas usando paquímetro com precisão de 0,001mm. A diferença entre as dimensões iniciais e as dimensões finais determinaram a taxa de retorno dos briquetes, conforme a Equação 8. Foram utilizadas oito repetições por tratamentos.

$$TRV(\%) = \left( \frac{Df - Di}{Df} \right) \times 100 \quad (8)$$

LEGENDA: TRV(%) Taxa de Retorno em volume dos briquetes; Di: Dimensão inicial; Df: Dimensão final

#### 4.3.2.3 Densidade Aparente

A densidade aparente dos briquetes foi determinada por meio do método estequiométrico através da norma NBR 14984 (ABNT, 2003). A massa foi determinada utilizando balança analítica com precisão 0,001g. As dimensões dos briquetes foram determinadas utilizando-se um paquímetro digital com precisão de 0,001mm. As dimensões e a massa dos briquetes foram mensurados imediatamente após a sua produção. Posteriormente, os briquetes foram mantidos em uma sala de aclimação com temperatura de 23 °C e umidade relativa ±65% por 24 horas até atingirem o teor de umidade de equilíbrio, seguido de uma nova determinação das suas dimensões e peso. Foram utilizadas oito repetições por tratamento.

#### 4.3.2.4 Resistência a Compressão

Para o ensaio mecânico de compressão foram utilizados três corpos-de-prova (briquetes) de cada tratamento, totalizando 51 corpos de prova de alburno e 51 corpo de prova do cerne. A seleção dos briquetes para o ensaio foi aleatória, sendo que alguns briquetes selecionados apresentavam deformações. A célula de carga utilizada foi Trd 27, enquanto que a velocidade do ensaio foi de 0,03 cm/min, aplicada no sentido diametral dos briquetes. O ensaio era finalizado quando os briquetes rompiam. A máquina utilizada para os ensaios foi a Emic DL30000N, seguindo as diretrizes na norma NBR 7222/94 - compressão diametral, sendo adapta aos briquetes (FIGURA 3).

FIGURA 3 - CORPO-DE-PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE COMPRESSÃO



FONTE: O autor (2018).

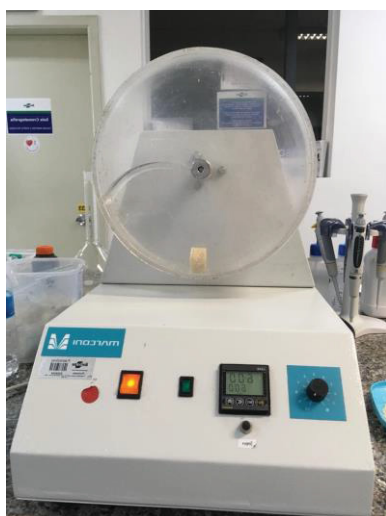
#### 4.3.2.5 Durabilidade Mecânica ao Atrito

Para os ensaios de durabilidade mecânica ao atrito foi utilizado um corpo-de-prova de cada tratamento, totalizando 13 briquetes de cerce e 13 de alburno. Cada corpo-de-prova foi submetido a um tempo de 10 minutos sob rotação em um tambor, sendo 5 minutos na posição lateral e 5 minutos na face frontal dos briquetes a 50 rotações por minuto (RPM). Posteriormente, os finos gerados foram classificados em uma peneira de 4 *mesh*. A metodologia utilizada para determinação de tal ensaio foi uma adaptação dos pellets de madeira (FIGURA 4). A determinação foi calculada em função da diferença da massa inicial e massa final, conforme a EQUAÇÃO (9):

$$Dm(\%) = \left( \frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100 \quad (9)$$

LEGENDA: DM: Durabilidade Mecânica; Minicial: Massa inicial; Mfinal: Massa final

FIGURA 4 - A) ENSAIO DE DURABILIDADE AO ATRITO DAS LATERAIS DOS BRIQUETES; (B) ENSAIO DE DURABILIDADE AO ATRITO DA FACE DOS BRIQUETES



(A)



(B)

FONTE: O autor (2018).

#### 4.3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a análise da morfologia, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura modelo JEOL JSM 6360- LV. disponível no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Paraná. Foram utilizados briquetes confeccionados com as temperaturas de 100 e 160°C. A determinação dessas condições se deu em função das condições dos tratamentos mais extremos envolvidos no arranjo experimental. Primeiramente foram retirados pedaços do briquetes com o objetivo de avaliar a estrutura externa destes, em seguida, as amostras foram recobertas previamente com uma fina camada de “ouro” por meio de um sistema de *sputtering* (metalização). Posteriormente, foram adquiridas imagens de alta resolução para cada amostra, em diferentes magnitudes de 500, 1000 e 5000x de magnificação.

#### 4.3.3 Análises realizadas tanto em Madeira como em Briquetes

##### 4.3.3.1 Análise termogravimétrica (TGA)

Para caracterização da madeira e de briquetes, utilizou-se um analisador termogravimétrico STD Q600 disponível no Laboratório de Tecnologia da Madeira da

Embrapa Florestas. Amostras de madeira e briquetes com aproximadamente 2 mg foram expostas a uma atmosfera oxidativa de ar sintético para simulação de um processo de combustão. O fluxo de gás foi fixado em 50 mL/min, a taxa de aquecimento foi de 10°C/min para um intervalo de temperatura de 30-600°C. Foram realizados quatro ensaios, sendo dois para cada material.

#### 4.3.3.2 Poder Calorífico Superior (PCS)

Para determinação do poder calorífico superior, foram utilizados tanto o material madeira quanto os briquetes, sendo que os briquetes foram moídos para realização das análises.

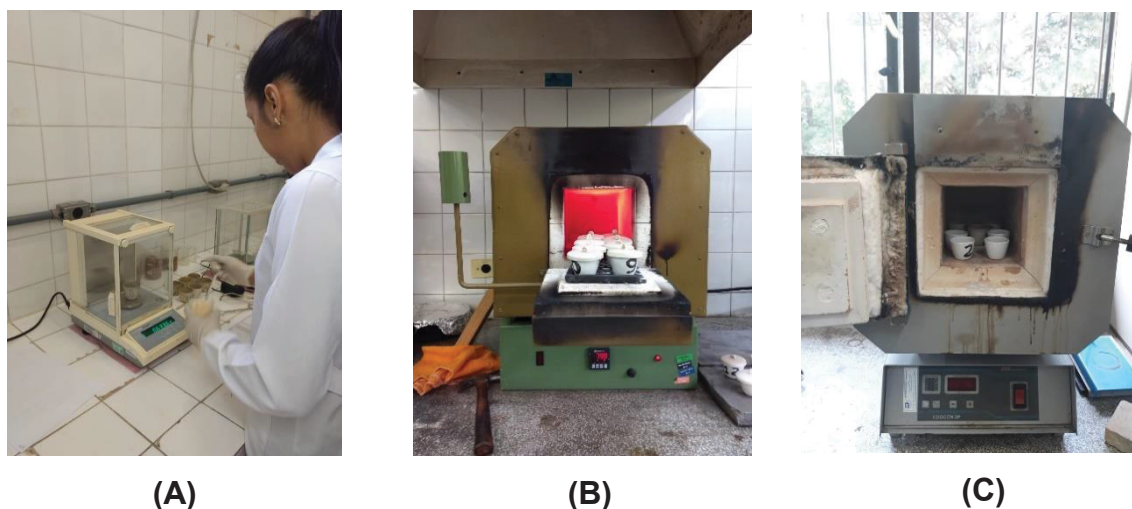
O material utilizado foi colocado em estufa com temperatura de  $103 \pm 2$  °C até massa constante. Para cada tratamento foi feito apenas uma análise, devido à homogeneidade do material. Utilizou-se 1g do material, em um calorímetro marca Jullius Petter, seguindo as diretrizes da ASTM D5865-13.

#### 4.3.3.3 Análise Química Imediata (AQI)

A análise química imediata do material foi realizada nas dependências do Laboratório de Energia de Biomassa da Universidade Federal do Paraná. Tal análise, corresponde aos teores de carbono fixo, voláteis e cinzas. O material a ser utilizado (madeira *in natura* e briquetes) foi colocada em estufa com  $103 \pm 2$ °C durante 24h até obtenção de massa constante. Posteriormente, o material foi colocado em dessecadores até atingir temperatura ambiente.

Primeiro, os cadinhos de porcelana foram calcinados a 500°C, visando retirar possíveis resíduos de análises anteriores. O peso dos cadinhos foi mensurado e, posteriormente, foram colocados 3g de material, em seguida, as amostras foram devidamente tampadas e colocadas na porta da mufla durante 3 minutos. Estes foram inseridos dentro da mufla por 7 minutos, totalizando 10 minutos o tempo de ensaio. A temperatura a qual foram submetidas as amostras foi de 900°C. Para determinação do teor de cinzas, foi mensurado o teor de coque obtido após os 10 minutos, e colocado em uma mufla modelo EDGCON 3P a uma taxa de aquecimento de 5°C/min até atingir 700°C durante 7 horas. Posteriormente, foi novamente mensurado o peso dos cadinhos (FIGURA 5).

FIGURA 5 - DIFERENTES ETAPAS PARA DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DOS BRIQUETES E DA MADEIRA DE *SCHIZOLOBIUM PARAHYBA*



FONTE: O autor (2018)

LEGENDA: (A) Mensuração da massa; (B) Determinação do teor de voláteis e carbono fixo; (C) Determinação das cinzas.

Para calcular o teor de voláteis, seguiu-se a norma E872-82 (ASTM, 2013a), onde adotou-se a EQUAÇÃO 10:

$$TV(\%) = \left( \frac{Ms - M_{spm}}{Ms} \right) * 100 \quad (10)$$

LEGENDA: TV (%) Teor de voláteis em porcentagem; Ms: Massa seca; Mspm: Massa seca pós-mufla.

Para determinar o teor de cinzas, utilizou-se a norma 1102-84 (ASTM, 2013b), através da EQUAÇÃO 11:

$$TCZ(\%): \left( \frac{Trcz}{Ms} \right) * 100 \quad (11)$$

LEGENDA: TCZ (%) Teor de cinzas em porcentagem; Trcz: Tara+cinzas; Ms: Massa seca.

Para obter o valor do carbono fixo presente no material, utilizou-se a normativa E87182 (ASTM, 2013c), conforme a EQUAÇÃO 12:

$$CF(\%): 100 - (TV + TCZ) * 100 \quad (12)$$

LEGENDA: CF(%) Carbono fixo; TV: Teor de voláteis; TCZ: Teor de cinzas.

#### 4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para os ensaios de taxa de retorno em volume, perda de massa e densidade aparente foi realizado a análise de agrupamento MATLAB R2018b visando verificar através dos parâmetros utilizados similaridade entre estes para formação de grupos. Para o ensaio de módulo de ruptura, além das análises química imediata e poder calorífico superior foi empregado a análise de variância no *software R*.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 UMIDADE E ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA

A TABELA 2 apresenta os resultados da umidade com a análise química da madeira. A umidade de alburno utilizada para produção dos briquetes foi de 12,6%, enquanto para o cerne foi de 12,2%.

TABELA 2 - UMIDADE E ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA DE *SCHIZOLOBIUM PARAHYBA*

| Tratamento | Umidade (%) | Ext. totais (%) | L. Insolúvel (%) | L. solúvel (%) | L. Total (%) | Holo (%) |
|------------|-------------|-----------------|------------------|----------------|--------------|----------|
| Alburno    | 12,6        | 6,75            | 22,92            | 1,19           | 24,11        | 69,14    |
| Cerne      | 12,2        | 5,84            | 23,59            | 1,07           | 24,66        | 69,5     |

Fonte: O autor (2019)

Legenda: Ext. totais – extrativos totais; L. Insolúvel – lignina insolúvel; L. total – lignina total; Holo – holocelulose.

Silva *et al.* (2013) em seu trabalho sobre a caracterização tecnológica da madeira de *Schizolobium amazonicum* para produção de celulose *kraft* encontraram valores de 5,71% de extrativos totais para o alburno e 4,90% para o cerne. Os autores justificam que o fato do alburno possuir maior quantidade de extrativos pode ser atribuído ao fato do alburno possuir algumas classes de extrativos que não se encontram no cerne. No entanto, os valores encontrados no presente trabalho foram superiores ao encontrado pelos autores. Modes *et al.* (2018) encontraram um percentual de 6,54 a 6,77% de extrativos totais para *S. amazonicum*. Valor similar ao encontrado neste estudo.

O teor de lignina insolúvel e total para o cerne foi superior ao encontrado para o alburno. A literatura reporta que o percentual de lignina no Paricá pode chegar a 35% (SOUZA *et al.*, 2003). Modes *et al.* (2018) encontraram para a espécie cerca de 28,97% de lignina para a madeira de *Schizolobium amazonicum* com 14 anos de idade.

Para o teor de holocelulose, o percentual variou entre 65,17% para o alburno e 70,91% para o cerne. Comparando com outra espécie nativa, Klitzke *et al.* (2008) encontrou para *Hymenaea* sp. o teor de holocelulose 64,01% para o alburno e 58,53% para o cerne.

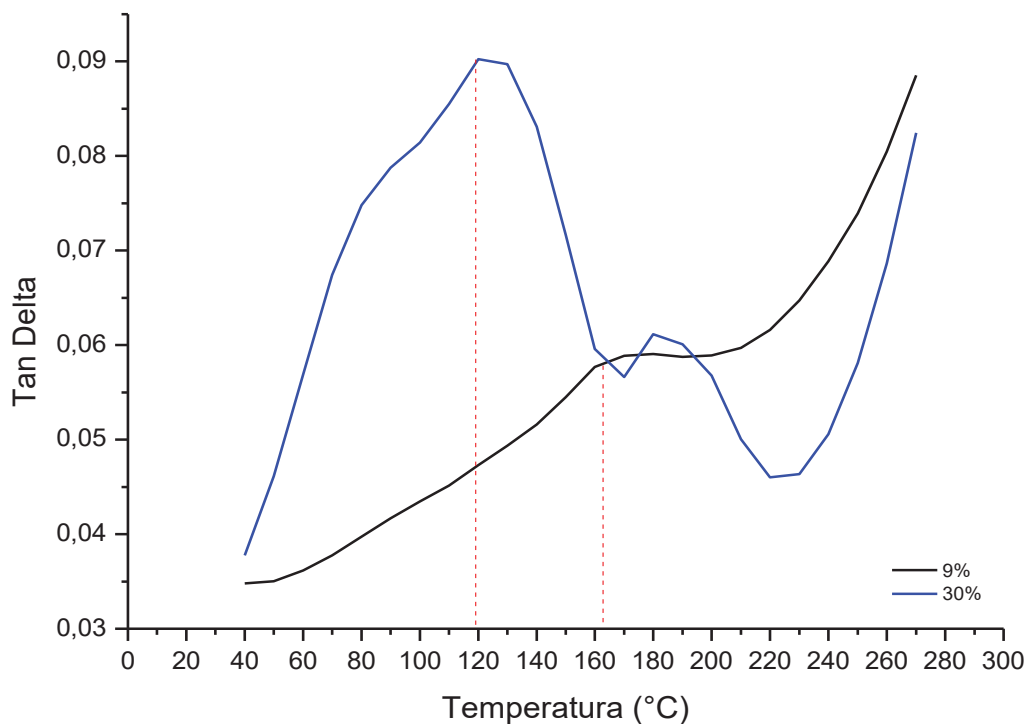
## 5.2 ANÁLISE MECÂNICA DINÂMICA – DMA

A transição vítrea da madeira pode ser definida como a temperatura da qual um polímero amorfo começa a amolecer. Abaixo da temperatura vítrea, o polímero apresenta características de um vidro, ou seja, rígido (PHILIPP, 1988). Esse conceito é de grande relevância quando se estuda briquetes de madeira, pois devido ao amolecimento da lignina, esta se torna um adesivo e, conseqüentemente, influenciando nas propriedades dos briquetes. Ainda de acordo com Philipp (1988), isso ocorre devido ao aumento da área de contato aliada a interdifusão das cadeias poliméricas, causada pelo aumento do movimento molecular que se estabelece acima do ponto de transição vítrea.

Através da FIGURA 6, que explana a análise dinâmico-mecânica (DMA), é possível observar que a temperatura de transição vítrea da lignina para o cerne da madeira de *Schizolobium parahyba* a 9% de umidade foi de 160°C, enquanto que para madeira de cerne com 30% foi de 120°C. Isso corrobora positivamente e parcialmente com as definições de processamento dos briquetes nesse trabalho que é 100 a 160°C.

Não foi possível verificar o ponto de transição vítrea para o alburno. Essa limitação está relacionada a menor resistência mecânica as cargas cíclicas e aumento da temperatura, bem como a difícil visualização do ponto máximo de inflexão na variável Tan Delta, sendo esta última como possível relação ao menor teor de lignina presente no alburno em comparação ao cerne (FIGURA 6).

FIGURA 6 - ANÁLISE MECÂNICO DINÂMICO MOSTRANDO A TEMPERATURA QUE OCORRE A TRANSIÇÃO VÍTEA DA LIGNINA NA MADEIRA DE *Schizolobium parahyba*



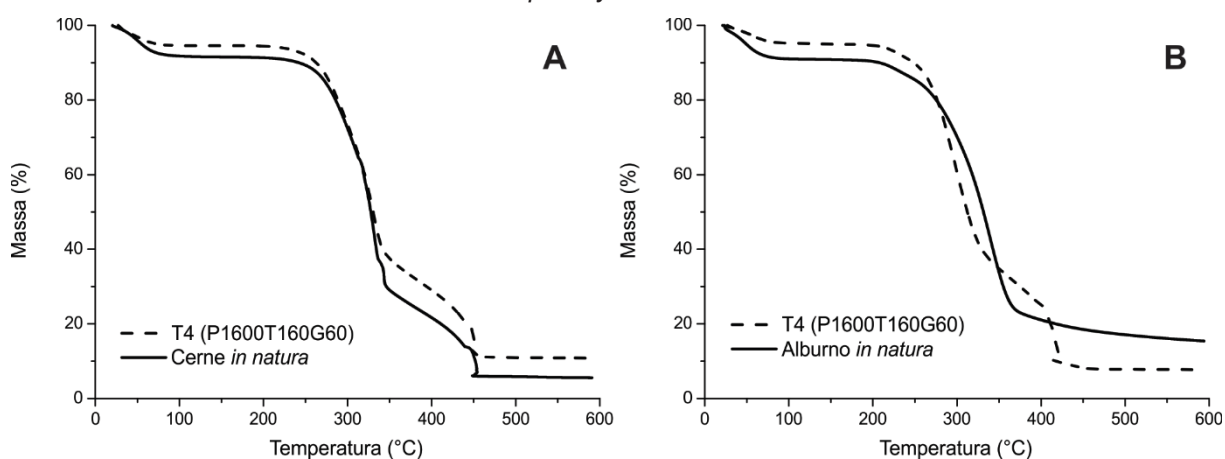
FONTE: O autor (2018)

Os dados encontrados neste trabalho, onde a temperatura de transição vítrea para a madeira do cerne de *Schizolobium parahyba* a 9% de umidade, também puderam ser observados no estudo realizado por Bouajila *et al.* (2006) que afirmaram que a temperatura de transição vítrea para madeira seca ocorre a partir de 160°C. No entanto, dependendo da umidade da madeira a temperatura de transição vítrea pode variar, ocorrendo em temperatura menores, em torno de 60 a 95 °C, ou seja, quanto maior o teor de umidade, menor será a temperatura de transição vítrea da lignina (IRVINE, 1984; FENGEL; WEGENER, 1989; BHUIYAN *et al.*, 2000; SIVONEN *et al.*, 2002; WIKBERG; MAUNU, 2004; PONCSÁK *et al.*, 2006). Outro fator que pode contribuir para a transição vítrea da lignina é o peso molecular que, de acordo com Menefee (1976), isso ocorre devido em decorrência do aumento do grau de ligações cruzadas.

### 5.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A seguir, é apresentada a análise de degradação térmica para madeira *in natura*, além do tratamento 4 (P1600T160G60) dos briquetes, usado neste ensaio devido apresentar as condições mais drásticas para as variáveis usadas no estudo. Através da curva termogravimétrica é possível observar a decomposição dos componentes da madeira, por meio de eventos térmicos representados por patamares.

FIGURA 7 - TERMOGRAVIMETRIA DE MADEIRA *IN NATURA* E BRIQUETES DE CERNE E ALBURNO DE *Schizolobium parahyba*



FONTE: O autor (2018)

De acordo com Belgacem e Pizzi (2016), a partir de 100°C ocorre a evaporação e voláteis de baixa massa molecular, conforme observado na FIGURA 7 para os briquetes de cerne e alburno. Conforme ocorre o aumento da temperatura, ocorre pouca degradação até os 200°C, quando se inicia a quebra das ligações químicas por desidratação, e possivelmente os mecanismos de radical livre eliminam água, produzindo gases voláteis. O comportamento para essa faixa de temperatura observado no presente estudo corrobora com essa afirmação. Na ausência ou quantidades limitadas de oxigênio, esse processo de degradação termal é chamado de pirólise. Observa-se que no presente estudo a perda de massa dos briquetes, especialmente para o alburno, é sutilmente verificada na faixa de temperatura entre 200 e 300°C. Segundo os mesmos autores, a madeira começa a degradar termicamente a partir de 250°C, e entre 300 e 375°C a maioria dos carboidratos se degradam e somente a lignina permanece na estrutura da madeira.

A hemicelulose começa a se decompor aproximadamente a 225°C e é completamente degradada a 325°C. A celulose é mais estável termicamente até 370°C, ocorrendo a sua decomposição total em uma curta faixa de temperatura. Parte da lignina (*acid lignin* e *milled wood lignin*, especificamente) começa a se decompor a 200 °C, porém é mais estável termicamente quando comparada aos carboidratos presentes na madeira. s são mais estáveis a degradação termal quando comparadas com polímeros de carboidratos. Já a celulose, nos seus primeiros estágios da degradação, abaixo de 300 °C, a massa molecular é reduzida devido a despolimerização causada por reações de desidratação. Os principais produtos dessa degradação são CO (monóxido de carbono) e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) produzidos por descarboxilação e descarbonilação, além da água e carvão. A formação de CO e CO<sub>2</sub> é muito mais rápida na presença de oxigênio em relação ao nitrogênio, em que essa taxa aumenta em função do aumento da temperatura (BELGACEM; PIZZI, 2016).

#### 5.4 ANÁLISE ENERGÉTICA DOS BRIQUETES E DA MADEIRA DE *Schizolobium parahyba*

Na TABELA 3, observa-se que o teor de voláteis e o carbono fixo dos briquetes e da matéria-prima de alburno não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos. Porém, o mesmo não ocorreu para as cinzas dos briquetes e matéria-prima do alburno. Para o teor de voláteis, carbono fixo e cinzas dos briquetes e matéria-prima do cerne, foi possível observar diferenças estatísticas entre os tratamentos.

TABELA 3 - TEOR DE VOLÁTEIS, CINZAS E CARBONO FIXO DE ALBURNO E CERNE PARA MADEIRA *IN NATURA* E PARA OS BRIQUETES DE *Schizolobium parahyba*

| <b>Alburno</b>           |                               |                   |                         |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------|
| <b>Tratamento</b>        | <b>Materiais Voláteis (%)</b> | <b>Cinzas (%)</b> | <b>Carbono fixo (%)</b> |
| Madeira <i>in natura</i> | 79,09 ± 0,32                  | 0,87a ± 0,06      | 20,05 ± 0,28            |
| 1. (P1000T100P60)        | 79,6 ± 0,70                   | 0,60b ± 0,01      | 19,79 ± 0,71            |
| 2. (P1600T100G60)        | 79,35 ± 0,17                  | 0,70a ± 0,04      | 19,94 ± 0,13            |
| 3. (P1000T160G60)        | 78,85 ± 0,76                  | 0,76a ± 0,09      | 20,37 ± 0,84            |
| 4. (P1600T160G60)        | 78,88 ± 0,66                  | 0,75a ± 0,03      | 20,36 ± 0,65            |
| 5. (P1000T130G40)        | 80,19 ± 0,69                  | 0,55b ± 0,08      | 19,21 ± 0,65            |
| 6. (P1600T130G40)        | 79,86 ± 0,40                  | 0,55b ± 0,11      | 19,58 ± 0,4             |
| 7. (P1000T130G80)        | 78,96 ± 1,04                  | 0,74a ± 0,15      | 20,29 ± 0,89            |
| 8. (P1600T130G80)        | 78,96 ± 0,76                  | 0,74a ± 0,11      | 20,28 ± 0,69            |
| 9. (P1000T100G40)        | 80,44 ± 0,44                  | 0,51b ± 0,06      | 19,03 ± 0,5             |
| 10. (P1300T160G40)       | 79,71 ± 1,21                  | 0,62b ± 0,18      | 19,65 ± 1,21            |
| 11. (P1300T100G80)       | 79,51 ± 0,32                  | 0,77a ± 0,03      | 20,29 ± 0,34            |
| 12. (P1300T160G80)       | 79,75 ± 1,24                  | 0,87a ± 0,03      | 20,28 ± 1,25            |
| 13. (P1300T130G60)       | 79,39 ± 0,57                  | 0,70a ± 0,01      | 19,03 ± 0,57            |
| <b>Cerne</b>             |                               |                   |                         |
| <b>Tratamento</b>        | <b>Materiais Voláteis (%)</b> | <b>Cinzas (%)</b> | <b>Carbono fixo (%)</b> |
| Madeira <i>in natura</i> | 82,12a ± 0,31                 | 0,33c ± 0,09      | 17,54b ± 0,40           |
| 1. (P1000T100P60)        | 79,40b ± 0,20                 | 0,57b ± 0,09      | 20,02a ± 0,12           |
| 2. (P1600T100G60)        | 79,86a ± 0,89                 | 0,43c ± 0,10      | 18,33b ± 0,86           |
| 3. (P1000T160G60)        | 79,86b ± 0,64                 | 0,50b ± 0,05      | 19,62a ± 0,63           |
| 4. (P1600T160G60)        | 80,80a ± 0,62                 | 0,49b ± 0,08      | 18,70b ± 0,56           |
| 5. (P1000T130G40)        | 80,60a ± 0,97                 | 0,51b ± 0,10      | 18,87b ± 1,05           |
| 6. (P1600T130G40)        | 80,45a ± 1,85                 | 0,55b ± 0,05      | 18,99b ± 0,69           |
| 7. (P1000T130G80)        | 78,85b ± 0,21                 | 0,73a ± 0,09      | 19,70a ± 0,3            |
| 8. (P1600T130G80)        | 79,33b ± 0,36                 | 0,71a ± 0,11      | 19,94a ± 0,25           |
| 9. (P1000T100G40)        | 80,96a ± 0,84                 | 0,4c ± 0,18       | 18,62b ± 0,66           |
| 10. (P1300T160G40)       | 81,05a ± 0,43                 | 0,4c ± 0,01       | 18,53b ± 0,42           |
| 11. (P1300T100G80)       | 79,58b ± 1,02                 | 0,76a ± 0,12      | 19,64a ± 0,94           |
| 12. (P1300T160G80)       | 79,48b ± 0,58                 | 0,71a ± 0,06      | 19,80a ± 0,53           |
| 13. (P1300T130G60)       | 79,47b ± 1,20                 | 0,68a ± 0,01      | 19,84a ± 1,19           |

FONTE: O autor (2018)

LEGENDA: P: pressão; T: temperatura; G: granulometria

Estudo realizado por Pereira *et al.* (2013) para madeira de Eucalipto verificou que o teor de voláteis, carbono fixo e cinzas foi em média de 74,04 %, 25,55% e 0,40%, respectivamente. Nesse estudo, o teor de voláteis variou de 78,85 a 80,44% para os briquetes de alburno, enquanto que para os briquetes de cerne variou entre

78,85 a 81,05%. Para madeira *in natura* de alburno o teor de voláteis foi de 79,09%. A madeira *in natura* de cerne apresentou um teor de voláteis de 82,12%.

Os valores obtidos para os briquetes de *Schizolobium parahyba* de alburno e cerne além da madeira *in natura* estão de acordo com os encontrados em literatura.

Morais *et al.* (2004) afirmaram que os valores de 76% a 86% para o teor de voláteis, encontrados para madeira estão condizentes com a realidade e ratificaram que este é o principal responsável pela maior parte da geração de calor na combustão. Todavia, a referida característica é fortemente influenciada origem da matéria-prima, além da composição química do material.

De acordo com Nogueira e Lora (2010), quanto menor o teor de voláteis, melhor será para a madeira, pois esta tende a queimar mais lentamente. De acordo com Dias Júnior *et al.* (2014), altos teores de matérias voláteis são desejados em situações que necessitem de formações de labaredas como lareiras, olarias e fornalhas, sendo dessa forma, recomendados para os referidos usos.

Com relação ao carbono fixo para os briquetes de alburno os valores variaram entre 19,03 a 20,37% e para o cerne 18,33 a 20,03%. Tabarés (2000), concluiu que o carbono fixo é o maior contribuinte de fonte energética quando a biomassa é aplicada como combustível, pois aumenta a produção de energia durante a combustão e o rendimento energético do combustível nos fornos.

Oliveira *et al.* (2010) concluem que o teor de carbono fixo é inversamente proporcional ao teor de materiais voláteis. Brand *et al.* (2010) afirmam que o percentual de carbono fixo, tanto de conífera, quanto de folhosa varia entre 15 a 25%. Os valores citados pelos autores estão de acordo com os encontrados nesse estudo.

Outro componente da análise química imediata é o teor de cinzas. Como foi explanado na tabela acima, houve diferença para os tratamentos dos briquetes quanto da madeira. Para a madeira *in natura*, o percentual de cinzas varia de 0,3% no cerne para 0,8% no alburno. Perez *et al.* (2014) avaliando a composição inorgânica de dez espécies mexicanas alcançou medias de 0,7% de cinzas para o cerne e 1,12% para o alburno.

Para os briquetes de alburno, o percentual de cinzas variou de 0,51 a 0,87%. Em valores absolutos, é possível observar que no alburno o tratamento que gerou maior teor de cinzas, cerca de 0,87% (T12) e o tratamento que gerou menor teor de cinzas, cerca de 0,51% (T9) mostrou um acréscimo de 41% no percentual de cinzas. Para o cerne, o percentual de cinzas variou 0,40 a 0,73%. Em valores absolutos entre

os tratamentos que mais e menos geraram teor de cinzas, houve um acréscimo de 45% na geração de cinzas. Essas diferenças, porém, não podem ser atribuídas as condições de processamento, pois as temperaturas utilizadas não são altas o suficiente para o aumento de teor de cinzas. Essa variação pode ser considerada aleatória e ocorre em função de características intrínsecas da madeira.

Barcellos *et al.* (2005), encontrou valores para madeira de Eucalipto em torno de 0,42 a 0,96%, relatando teores de cinzas de madeira correspondente em geral a menos de 1% na base seca. Klitzke *et al.* (2008), caracterizou os lenhos de cerne e alburno de *Hymenaea* sp, visando ao agrupamento para fins de secagem convencional. Os autores concluíram que não há diferença estatística para o cerne e o alburno com relação ao teor de cinzas. O estudo dos autores alcançou cerca de 0,32% de cinzas para o cerne e alburno da espécie supracitada. Paes *et al.* (2013), analisaram os efeitos dos extrativos e cinzas na resistência natural de quatro espécies (Angico, Craibeira, Cumaru e Eucalipto) a cupins xilófagos. Os autores também não encontraram diferenças significativas no teor de cinzas para essas espécies, tanto no cerne quanto no alburno.

Freitas *et al.* (2016), avaliando o efeito da pressão e o tempo de compactação nas propriedades de briquetes de resíduos madeiros de Paricá, obtiveram um percentual de 0,5% de cinzas, valor este, inferior na maioria dos tratamentos avaliados nesse estudo para a mesma espécie. Ainda os autores concluíram que o percentual de cinzas varia em função da procedência do material. No entanto, Fonte *et al.* (2017), avaliando as propriedades físicas e químicas da madeira de cerne e alburno de *Cryptomeria japonica* encontraram diferença significativa para as duas partes, cerca de 0,67% de cinzas para o cerne e 0,31% para o alburno, para a espécie de modo geral, o valor encontrado foi de 0,39%. Segundo Fengel e Wegener (1989), o teor de cinzas varia entre 0,1 a 1%, porém existem exceções do qual o percentual de cinzas pode alcançar valores relativamente altos. Kolmann (1959) afirma que a quantidade de cinzas varia em função da espécie, idade, clima, época de colheita, tipo de solo e posição da madeira.

A quantidade de cinzas presente na madeira é um fator de grande relevância, tendo em vista que, quanto maior o teor de cinzas, ocorre uma redução no poder calorífico da madeira. Outro problema ocasionado pelas cinzas está relacionado ao aumento da limpeza dos cinzeiros das fornalhas, além de acarretar a corrosão de metais (NEVES *et al.*, 2011). Reis *et al.* (2012) e Silva *et al.* (2012) afirmam que assim

como na madeira, no carvão vegetal a quantidade de cinzas é de grande importância, pois os componentes inorgânicos não sofrem combustão, o que consequentemente reduz o poder calorífico do carvão.

Outra variável de grande importância para a caracterização energética é o poder calorífico. Como pode ser observado na TABELA 4, não há diferença estatística para o poder calorífico tanto para os briquetes e matéria-prima do alburno quanto para os briquetes cerne.

TABELA 4 - PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA *IN NATURA* E DOS BRIQUETES DE ALBURNO E CERNE DE *Schizolobium parahyba*

| Tratamento               | PCS (kcal kg <sup>-1</sup> ) |              |
|--------------------------|------------------------------|--------------|
|                          | Alburno                      | Cerne        |
| Madeira <i>in natura</i> | 4369 ± 8,20                  | 4531 ± 15,02 |
| 1. (P1000T100P60)        | 4381 ± 19,00                 | 4563 ± 19,00 |
| 2. (P1600T100G60)        | 4420 ± 12,5                  | 4673 ± 12,5  |
| 3. (P1000T160G60)        | 4431 ± 27,5                  | 4642 ± 27,5  |
| 4. (P1600T160G60)        | 4360 ± 20,00                 | 4636 ± 20,00 |
| 5. (P1000T130G40)        | 4483 ± 7,00                  | 4624 ± 7,00  |
| 6. (P1600T130G40)        | 4431 ± 3,50                  | 4592 ± 3,50  |
| 7. (P1000T130G80)        | 4431 ± 3,50                  | 4718 ± 3,50  |
| 8. (P1600T130G80)        | 4392 ± 6,50                  | 4524 ± 6,50  |
| 9. (P1000T100G40)        | 4422 ± 15,50                 | 4652 ± 15,5  |
| 10. (P1300T160G40)       | 4275 ± 2,50                  | 4589 ± 1,5   |
| 11. (P1300T100G80)       | 4470 ± 2,00                  | 4720 ± 2,00  |
| 12. (P1300T160G80)       | 4462 ± 7,50                  | 4641 ± 7,50  |
| 13. (P1300T130G60)       | 4451 ± 6,50                  | 4638 ± 6,50  |

FONTE: O autor (2018)

LEGENDA: P: pressão; T: temperatura; G: granulometria; PCS: poder calorífico superior

Com relação ao poder calorífico, o estudo mostrou que os dados encontrados para a madeira corroboram com os encontrados em literatura. Santos *et al.* (2011) em seu trabalho que verificava a quantidade de poder calorífico na madeira de espécies do gênero *Eucalyptus* observou que o poder calorífico superior variou entre 4.274 a 4.585 kcal kg<sup>-1</sup>. Quirino *et al.* (2005) em um estudo relacionado ao poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos verificou a quantidade de poder calorífico em algumas espécies nativas como a seringueira, pau santo e Morototó que possuem densidade semelhante ao *S. parahyba* (0,40g/cm<sup>3</sup>) e verificou valores de 4.485, 4.747 e 4556 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

É importante ressaltar que o presente estudo avaliou o poder calorífico de cerne e alburno de *S. parahyba* separadamente. Os resultados mostraram que não houve diferença estatística entre as partes analisadas. Para o alburno, o poder calorífico superior variou entre 4381 a 4483 kcal kg<sup>-1</sup>, enquanto que no cerne variou entre 4424 a 4720 kcal kg<sup>-1</sup>. Para o alburno a diferença entre o maior e menor poder calorífico foi em torno de 101 kcal kg<sup>-1</sup>. Para o cerne foi de 296 kcal kg<sup>-1</sup>. É importante observar que os briquetes de alburno apresentaram menor poder calorífico que o cerne. Para efeito comparativo, fazendo a diferença entre o maior poder calorífico do alburno (4483 kcal kg<sup>-1</sup>) e o maior poder calorífico do cerne (4720 kcal kg<sup>-1</sup>) fica em torno de 237 kcal kg<sup>-1</sup>. Em valores absolutos, houve um aumento de aproximadamente 5% do poder calorífico entre o maior poder calorífico dos briquetes de cerne com relação ao alburno. Para madeira *in natura*, o alburno apresentou 4369 kcal kg<sup>-1</sup>, enquanto que o cerne apresentou 4531 kcal kg<sup>-1</sup>. Esses valores foram semelhantes ao encontrados para os briquetes de ambas as partes. O fator preponderante para explicar o maior poder calorífico do cerne com relação ao alburno é maior quantidade de lignina. Esse fator é considerado de grande relevância para o aumento do poder calorífico superior (COSTA *et al.*, 2017).

Conforme Protasio *et al.* (2014), a quantidade de lignina é parâmetro fundamental para indicar o tipo de madeira mais apropriado para fins energéticos. Vidaurre *et al.* (2012) estudando energeticamente a madeira de *S. parahyba* com diferentes idades, verificou que o poder calorífico superior para árvores com 7 anos (idade mais utilizada para corte com finalidade energética) foi de 4.534 kcal/kg. Assim como Freitas *et al.* (2016), que obteve um valor de 4579 Kcal/. O valor encontrado pelos autores foi semelhante ao encontrado para os briquetes de cerne e superiores ao encontrados para o alburno.



## 5.5 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO PARA TAXA DE RETORNO EM VOLUME, PERDA DE MASSA E DENSIDADE APARENTE

A TABELA 5 mostra os resultados de densidade aparente, taxa de retorno em volume e perda de massa inerente ao processo para os briquetes de alburno.

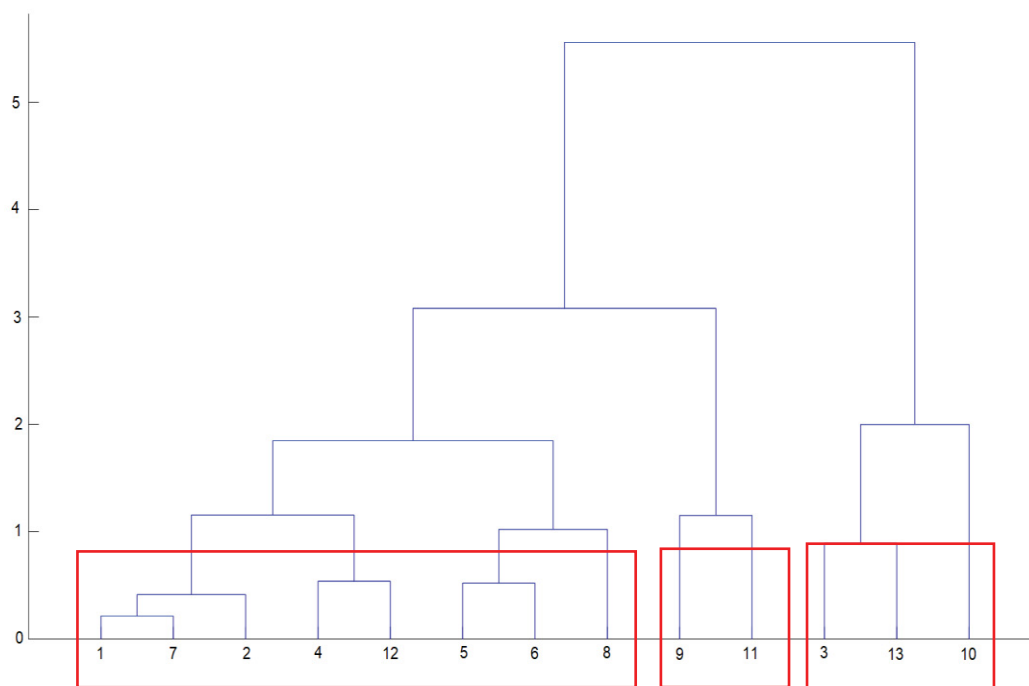
TABELA 5 - DENSIDADE APARENTE, TAXA DE RETORNO EM VOLUME E PERDA DE MASSA INERENTE AO PROCESSO PARA OS BRIQUETES DE ALBURNO

| Tratamento        | Densidade aparente<br>(g nm <sup>3</sup> ) | Taxa de retorno volume<br>(%) | Perda de massa<br>(%) |
|-------------------|--|-------------------------------|-----------------------|
| 1.(P1000T100G60)  | 0,86                                       | 2,46                          | 3,38                  |
| 2.(P1600T100G60)  | 0,81                                       | 2,44                          | 3,08                  |
| 3.(P1000T160G60)  | 1,05                                       | 3,08                          | 5,25                  |
| 4.(P1600T160G60)  | 1,1  | 2,94                          | 3,74                  |
| 5.(P1000T130G40)  | 1,02                                       | 2,29                          | 2,13                  |
| 6.(P1600T130G40)  | 1,05                                       | 2,11                          | 2,49                  |
| 7.(P1000T130G80)  | 0,95                                       | 2,41                          | 3,25                  |
| 8.(P1600T130G80)  | 1,06                                       | 3,00                          | 2,76                  |
| 9.(P1000T100G40)  | 1,00                                       | 2,71                          | 1,27                  |
| 10.(P1300T160G40) | 1,09                                       | 3,99                          | 4,17                  |
| 11.(P1300T100G80) | 0,98                                       | 3,75                          | 1,72                  |
| 12.(P1300T160G80) | 1,07                                       | 2,91                          | 3,53                  |
| 13.(P1300T130G60) | 0,95                                       | 3,07                          | 3,10                  |

FONTE: O autor (2019).

Através da TABELA 5, foi possível observar que os tratamentos 3, 4, 10 e 12 que possuem temperaturas mais elevadas (160 °C) apresentaram maior densidade aparente nos briquetes de alburno. Para a taxa de retorno em volume, no entanto, não foi possível associar nenhuma variável analisada sendo que os tratamentos 3, 8, 10, 11 e 13 apresentaram maior taxa de retorno em volume e possuem pressões, temperaturas e granulometrias distintas. Para perda de massa inerente ao processo o tratamento 3 foi o que apresentou maior perda de massa com cerca de 5, 25%. A FIGURA 8 mostra a análise de agrupamento para as três variáveis analisadas visando verificar a interação entre as três variáveis analisadas.

FIGURA 8 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE AGRUPAMENTO PARA BRIQUETES DE ALBURNO DE *Schizolobium parahyba*



FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 8 mostra que por meio da análise estatística de agrupamento para as variáveis densidade aparente, taxa de retorno em volume e perda de massa foi possível formar grupos com similaridade. O primeiro grupo é formado por diversos tratamentos com pressões, temperaturas e granulometrias aleatórias. O segundo grupo foi formado pelos tratamentos 9 e 11, em comum estes grupos apresentavam a temperatura de 100 °C. Para o terceiro grupo, que com exceção do tratamento 13, os tratamentos 3 e 10 formaram um grupo. Em comum, estes tratamentos possuem temperatura de 160 °C.

A TABELA 6 mostra os resultados de densidade aparente, taxa de retorno em volume e perda de massa inerente ao processo para os briquetes de cerne.

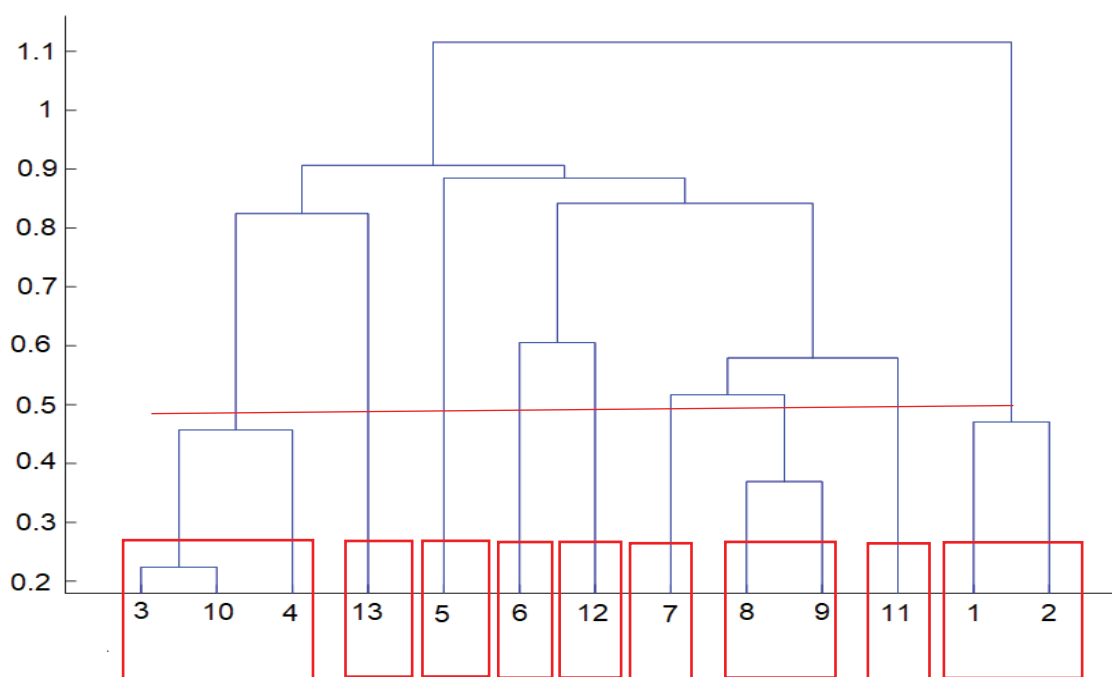
TABELA 6 - DENSIDADE APARENTE, TAXA DE RETORNO EM VOLUME E PERDA DE MASSA INERENTE AO PROCESSO PARA BRIQUETES DE CERNE

| Tratamento        | Densidade aparente<br>(g cm <sup>3</sup> ) | Taxa de retorno volume<br>(%) | Perda de massa (%) |
|-------------------|--|-------------------------------|--------------------|
| 1.(P1000T100G60)  | 1,06                                       | 1,54                          | 0,88               |
| 2.(P1600T100G60)  | 1,14                                       | 2,09                          | 1,06               |
| 3.(P1000T160G60)  | 1,11                                       | 1,82                          | 4,72               |
| 4.(P1600T160G60)  | 1,14                                       | 2,46                          | 4,43               |
| 5.(P1000T130G40)  | 1,06                                       | 2,75                          | 3,55               |
| 6.(P1600T130G40)  | 1,08                                       | 1,67                          | 3,36               |
| 7.(P1000T130G80)  | 1,06                                       | 2,37                          | 2,66               |
| 8.(P1600T130G80)  | 1,11                                       | 1,67                          | 2,55               |
| 9.(P1000T100G40)  | 1,12                                       | 1,55                          | 2,45               |
| 10.(P1300T160G40) | 1,15                                       | 2,03                          | 4,63               |
| 11.(P1300T100G80) | 1,12                                       | 1,28                          | 1,92               |
| 12.(P1300T160G80) | 1,14                                       | 1,35                          | 3,87               |
| 13.(P1300T130G60) | 1,1  | 3,17                          | 4,03               |

FONTE: O autor (2019).

Através da TABELA 6 é possível observar que para a variável densidade aparente, assim como nos briquetes de alburno, para os briquetes de cerne, tratamentos que possuem maiores temperaturas, apresentam briquetes com maior densidade aparente, com exceção do tratamento 2 que apresentou densidade aparente de 1,14 g cm<sup>3</sup>, sendo sua temperatura de 100 °C. Para a taxa de retorno o tratamento 13 foi o que apresentou o valor mais elevado com 3,17%. Para a perda de massa inerente ao processo o tratamento um foi o que apresentou menor perda com 0,88%. Através da FIGURA 9 foi possível verificar a análise de agrupamento para as variáveis densidade aparente, taxa de retorno em volume e perda de massa para os briquetes de cerne.

FIGURA 9 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE AGRUPAMENTO PARA BRIQUETES DE CERNE DE *Schizolobium parahyba*



FONTE: O autor (2018).

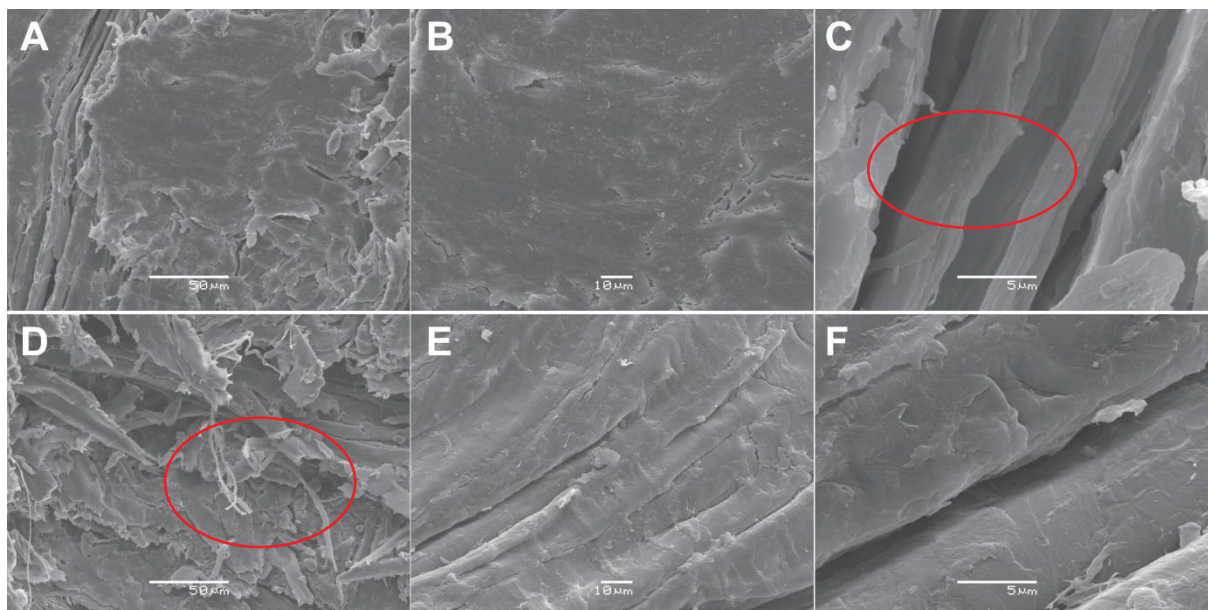
Através da FIGURA 9, foi possível observar que o primeiro grande grupo é formado pelos tratamentos 3, 4 e 10 que apresentam maior temperatura (160 °C). Um outro grupo foi formado com os tratamentos 8 e 9 com os valores das três variáveis diferentes. E um terceiro grupo foi formado com os tratamentos 1 e 2 que possuíam a menor temperatura (100°C). Os demais tratamentos foram separados individualmente. Nota-se que a variável temperatura foi determinante para a similaridade entre os grupos.

A análise de agrupamento mostrou que tanto para o alburno, quanto para o cerne, a temperatura foi a variável que contribuiu diretamente para a formação dos grupos formando grupos com temperaturas de 100 °C e 160 °C.

## 5.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Devido a temperatura ter sido a variável que mais influenciou na densificação como pode ser observado na análise de agrupamento dos briquetes, foi realizado a MEV dos briquetes de alburno e cerne com a menor e maior temperatura, ou seja, 100 e 160 °C, respectivamente como mostra as FIGURAS 10 e 11.

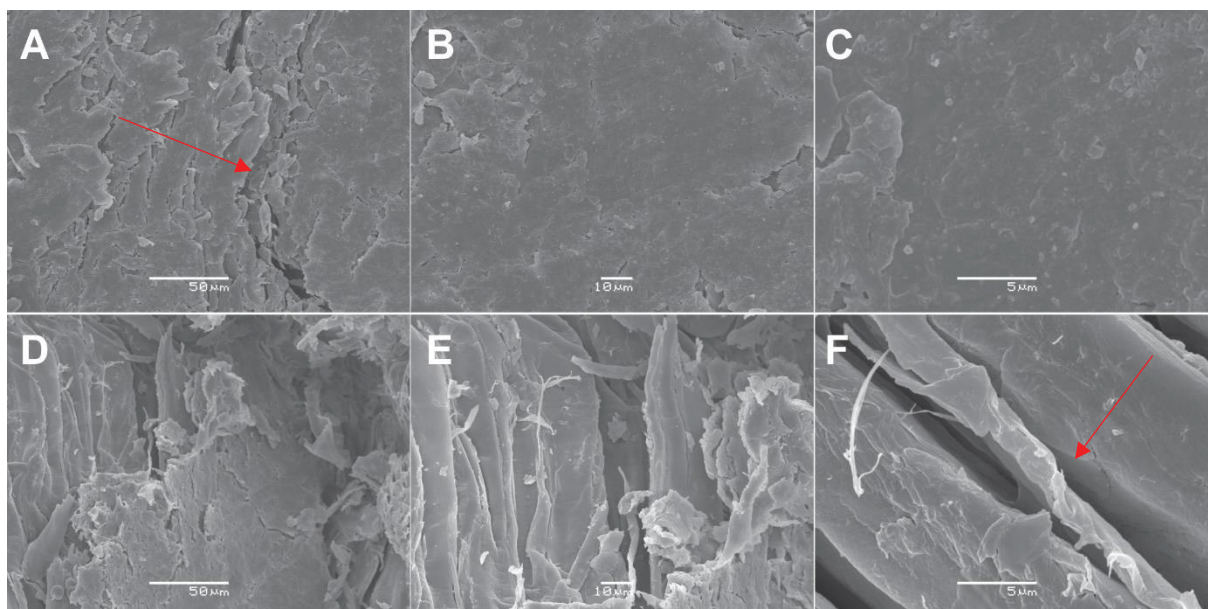
FIGURA 10 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS BRIQUETES DE ALBURNO PRODUZIDOS A 100 °C



FONTE: O autor (2018).

NOTA: Briquete produzido nas condições de 60 *mesh* e 1000 PSI com 500x (A), 1000x (B) e 5000x (C) de ampliação. Briquete produzido nas condições de de 60 *mesh* e 1600 PSI com 500x (D), 1000x (E) e 5000x (F) de ampliação.

FIGURA 11 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS BRIQUETES DE ALBURNO PRODUZIDOS A 160 °C



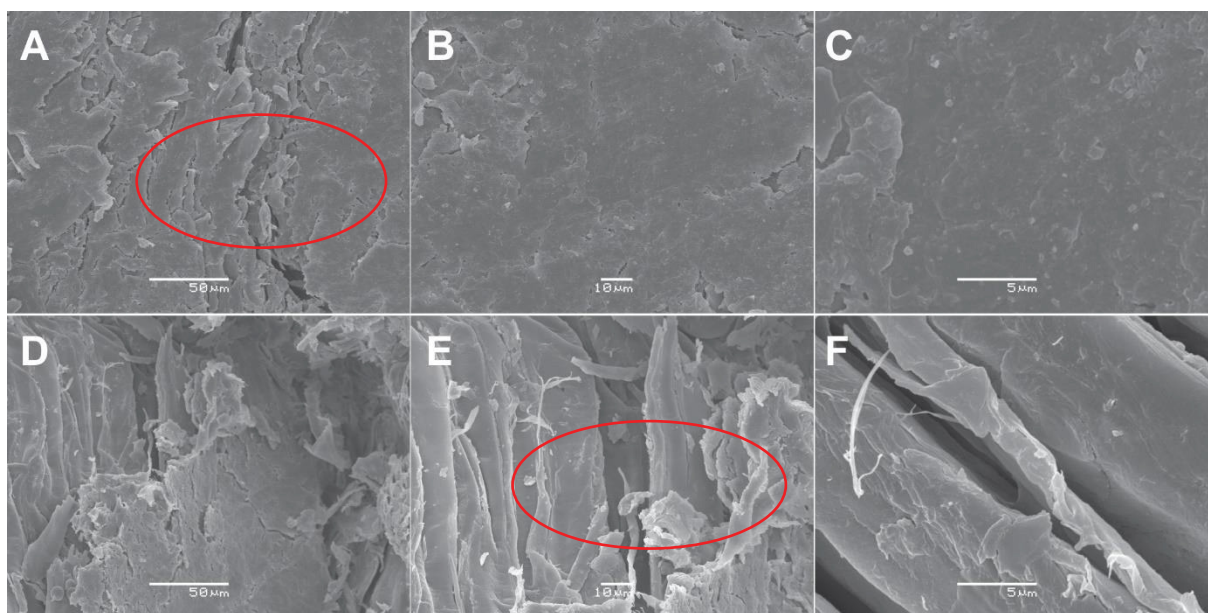
FONTE: O autor (2018).

NOTA: Briquete produzido nas condições de 60 *mesh* e 1000 PSI com 500x (A), 1000x (B) e 5000x (C) de ampliação. Briquete produzido nas condições de de 60 *mesh* e 1600 PSI com 500x (D), 1000x (E) e 5000x (F) de ampliação.

Como é possível observar, nas imagens obtidas dos briquetes de alburno com temperatura de 100 °C (FIGURA 10), as partículas estão menos adensadas, com maior quantidade de espaços vazios. Quando a temperatura muda para 160 °C a quantidade de espaços vazios diminui e se mostram mais adensadas. Isso pode ser observado nas imagens em diferentes magnificações. Também foi possível observar o rompimento das fibras nas diferentes magnificações.

As FIGURAS 12 e 13 mostram as imagens de MEV dos briquetes de cerne com magnificações de 500x, 1000x e 5000x.

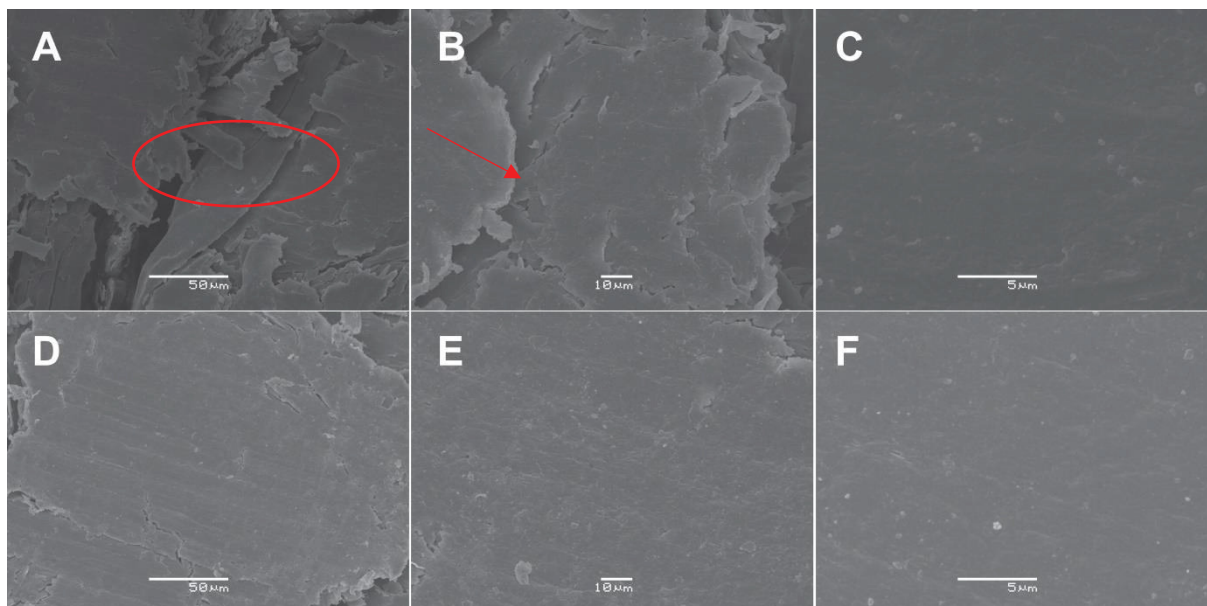
FIGURA 12 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS BRIQUETES DE CERNE PRODUZIDOS A 100 °C



FONTE: O autor (2018).

NOTA: Briquete produzido nas condições de 60 *mesh* e 1000 PSI com 500x (A), 1000x (B) e 5000x (C) de ampliação. Briquete produzido nas condições de de 60 *mesh* e 1600 PSI com 500x (D), 1000x (E) e 5000x (F) de ampliação.

FIGURA 13 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS BRIQUETES DE CERNE PRODUZIDOS A 160 °C



FONTE: O autor (2018).

NOTA: Briquete produzido nas condições de 60 *mesh* e 1000 PSI com 500x (A), 1000x (B) e 5000x (C) de ampliação. Briquete produzido nas condições de de 60 *mesh* e 1600 PSI com 500x (D), 1000x (E) e 5000x (F) de ampliação.

É possível observar que assim como no briquete de alburno, as partículas referentes aos tratamentos com menor temperatura de 100 °C encontram-se com maior quantidade de espaços vazios, enquanto que os briquetes com a temperatura mais elevadas (160 °C) encontram-se mais adensadas com menor incidência de espaços vazios.

Na FIGURA 3, briquete de cerne, é possível que a utilização de condições mais drásticas (temperaturas mais elevadas) reduziu as ondulações superficiais dos briquetes em função do maior adensamento. Além disso, estar relacionado com as condições mais drásticas, tem relação parcial com o uso de temperaturas similares ou superiores a temperatura de transição vítrea da lignina para matéria prima a 12% de umidade.

Kaliyan e Morey (2010) avaliaram ligantes naturais e mecanismos de ligação do tipo de ponte sólida em briquetes e *pellets* feitos de grama e palha de milho. Os autores afirmam que podem ocorrer a formação de pontes sólidas entre as partículas devido à cristalização de alguns ingredientes, reação química, endurecimento dos aglutinantes e solidificação dos componentes fundidos. Essas pontes sólidas são formadas principalmente durante o resfriamento e secagem de produtos densificados.

Durante o processo de compactação, as fibras podem se ligar umas sobre as outras, resultando em ligações interligadas.

Ainda os autores afirmam que devido à aplicação de altas pressões no momento da compactação, ocorre a aproximação das partículas causando forças de atração entre as partículas, e os componentes naturais de ligação na palha de milho e no briquete de grama foram adensados formando pontes sólidas entre as partículas. Depois de adensar, estas pontes sólidas endurecem. Isso fez com que os briquetes e os *pellets* se tornassem resistentes e duráveis. O mesmo pode ser observado neste trabalho para briquetes de *S.parahyba*, quando ocorre o endurecimento da lignina após a temperatura de transição vítrea.

Koliyan e Morey (2010), no seu estudo sobre briquetes e *pellets* de grama e palha de milho observaram que os aglutinantes naturais que foram revestidos sobre as partículas eram compostos principalmente de lignina e compostos de proteínas. Esses componentes têm relação direta com a resistência mecânica desses biocombustíveis. Observa-se que baseado no resultado do DMA que mostrou a Tg entre tais temperaturas para o cerne de *S. parahyba* e nas temperaturas de briquetagem, sugere-se a ativação dos ligantes naturais presentes na madeira, especialmente a lignina, o que resultou em briquetes com maior resistência a compressão.

Blesa *et al.* (2003) verificaram a temperatura de cura para briquetes de carvão vegetal. Os autores afirmaram que a morfologia dos briquetes curados a 200 °C (2 h) é mais uniforme porque as partículas estão mais próximas e há menor número de espaços vazios, o que explica sua maior resistência do que para briquetes curados a 150 e 200 °C. O mesmo encontrado pelos autores, foi observado neste trabalho, onde briquetes produzidos a uma maior temperatura apresentaram menor quantidade de espaços vazios, conseqüentemente aumentando a resistência dos briquetes.

Stelte *et al.* (2011) afirmam que as imagens de baixa a média resolução mostram espaços vazios com o aumento da temperatura de torrefação, indicando baixa aderência entre partículas adjacentes. Imagens obtidas com maior ampliação, fornecem uma visão mais profunda dos mecanismos de aderência e falha dos *pellets*. A superfície de falha do *pellet* indica uma falha coesiva com alta absorção de energia. Extremidades de fibra e partículas estão saindo da superfície e poucos vazios são encontrados. Isto sugere que as ligninas e hemiceluloses excederam as suas temperaturas de transição vítrea nas condições de peletização (por exemplo, teor de

umidade, temperatura e pressão), permitindo-lhes uma mobilidade suficiente para fluir nas fendas e fissuras e estabelecer pontes sólidas entre partículas adjacentes. O mesmo foi possível observar nesse trabalho para o *S. parahyba* através das imagens do MEV.

## 5.7 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E DURABILIDADE MECÂNICA AO ATRITO

Konish *et al.* (2017) em seu trabalho sobre a influência de diferentes condições de armazenamento nas propriedades físico-mecânicas de briquetes, enfatizaram a importância do teste de resistência a compressão, principalmente, porque estão diretamente relacionados ao manuseio, transporte e a estocagem, ou seja, verifica qual a é a resistência a compressão média que cada briquete pode suportar antes que ocorra uma ruptura durante o armazenamento, além de ser um indicador para melhoria no transporte.

Observa-se na TABELA 7 que no alburno os tratamentos 3 (22,16MPa), 4 (20,06 MPa) e 12 (22,83MPa) apresentaram maior resistência a compressão. É notável observar que para ambos os tratamentos se utilizou uma maior temperatura, porém pressões e granulometrias diferentes. Os menores valores estatisticamente foram os tratamentos 1 (9,01) e 2 (8,07MPa). Sendo estes com menor temperatura (100°C) e pressões distintas, dando indícios que o uso de baixas temperaturas e diferentes pressões interferem na resistência dos briquetes. Já os tratamentos 5, 6, 7, 8, 9, 11, 10, 11 e 13 compõem um terceiro grupo, com resistência a compressão variando de 10,33 MPa a 15,10 MPa sendo que estes, com exceção do tratamento 10, apresentam temperaturas de 100 e 130 °C. Em termos absolutos, o tratamento com menor resistência (2) para o tratamento mais resistente (12), houve um acréscimo de 65% na resistência dos briquetes. Nisto, observa-se que o uso de temperaturas mais baixas interfere na resistência dos briquetes

Para o cerne, os tratamentos 3, 4, 8 e 12 apresentaram maior resistência a compressão com valores de 23,46; 27,26; 24,33 e 24,17MPa, respectivamente. Já o tratamento 9 que apresenta menor temperatura mostrou menor resistência a compressão, cerca de 6,74MPa. Novamente, em valores absolutos, mostrou que houve um incremento de 75% no tratamento menos resistente mecanicamente (9) para o tratamento mais resistente (4).

TABELA 7 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE ALBURNO E CERNE DOS BRIQUETES DE *Schizolobium parahyba*

| TRATAMENTO         | Média ± ΔP (%) ALBURNO | Média ± ΔP (%) CERNE |
|--------------------|------------------------|----------------------|
| 1. (P1000T100P60)  | 9,01c ± 1,20           | 12,00c ± 0,32        |
| 2. (P1600T100G60)  | 8,07c ± 1,32           | 13,85c ± 0,39        |
| 3. (P1000T160G60)  | 22,16a ± 1,10          | 23,46a ± 1,68        |
| 4. (P1600T160G60)  | 20,06a ± 4,69          | 27,26a ± 3,37        |
| 5. (P1000T130G40)  | 15,10b ± 2,33          | 11,10c ± 0,57        |
| 6. (P1600T130G40)  | 13,38b ± 0,91          | 13,38c ± 0,91        |
| 7. (P1000T130G80)  | 12,71b ± 1,81          | 18,55b ± 2,08        |
| 8. (P1600T130G80)  | 16,54b ± 4,52          | 24,33a ± 2,38        |
| 9. (P1000T100G40)  | 12,16b ± 0,59          | 6,74d ± 0,45         |
| 10. (P1300T160G40) | 10,33b ± 0,70          | 20,74b ± 5,45        |
| 11. (P1300T100G80) | 13,42b ± 1,52          | 17,21b ± 1,32        |
| 12. (P1300T160G80) | 22,83a ± 3,02          | 24,17a ± 1,81        |
| 13. (P1300T130G60) | 13,42b ± 1,49          | 17,48b ± 0,95        |

FONTE: O autor (2018)

LEGENDA: P: pressão; T: temperatura; G: granulometria; ΔP: desvio padrão

Kambo e Dutta (2014) afirmam que a resistência a compressão para corpos-de-prova cilíndricos pode ser interpretada como a força de ligação interna ou a força máxima que pode suportar um corpo antes da ruptura durante o armazenamento. Dessa maneira, é possível correlacionar uma maior resistência dos briquetes dos tratamentos 3 e 4 ao maior adensamento, previamente observados nas imagens de MEV (FIGURAS 12 E 13), no qual o adensamento tem relação com uma maior adesão entre as partículas e conseqüentemente uma maior força de ligação interna.

Freitas *et al.* (2016) que avaliando briquetes de resíduos de *Schizolobium amazonicum* a uma temperatura de 120°C e pressão de 1500 PSI alcançou valores de 13,73 MPa de resistência a compressão dos briquetes. Fernandez *et al.* (2017) avaliaram as características mecânicas de diferentes tipos de biomassa como resíduos de bagaço de cana e serragem de pinus. Para a resistência a compressão, os autores obtiveram valores entre 0,2 a 0,8 MPa. Vale ressaltar que os autores não utilizaram temperatura para produção de briquetes. Nisto observa-se a importância de uma alta temperatura para confeccionar briquetes mais resistente mecanicamente. A resistência a compressão na maioria dos tratamentos deste trabalho mostrou maiores valores quando comparados a literatura.

De acordo com Mariani *et al.* (2005), o cerne possui maior quantidade de lignina, como foi exposto anteriormente. Além do teor de lignina contribuir com o aumento do poder calorífico superior, a lignina influencia diretamente na resistência dos briquetes. Dessa forma, este fato contribuiu para uma maior resistência a compressão dos briquetes de cerne comparado ao alburno em valores absolutos.

Outro resultado interessante a ser analisado é o fato de que briquetes submetidos a maior temperatura (160°C) também apresentarem maiores valores de resistência a compressão. Isso pode ser novamente atribuído a temperatura de transição vítrea da lignina. O gráfico de DMA previamente apresentado na FIGURA 6 mostrou que a temperatura de amolecimento da lignina girou em torno de 160°C para a madeira com 9% de umidade, valor semelhante a madeira submetida para produção dos briquetes desse estudo que foi de 12% de umidade.

Antes da temperatura de transição vítrea, a lignina se apresenta de forma completamente rígida, a medida que a temperatura aumenta, inicia a plasticização da lignina. Após a temperatura de transição vítrea, a lignina volta a ter um aspecto de vidro, inflexível, resultando em uma maior resistência a compressão.

Outro ensaio que está diretamente relacionada a resistência a compressão é a durabilidade mecânica. Através desse ensaio é possível prever o comportamento dos briquetes durante sua cadeia de fornecimento, indicando a capacidade dos briquetes para resistir ao manuseio e transporte.

A TABELA 8 mostra o percentual de finos gerados durante o ensaio. É possível notar que os briquetes de cerne geraram menor quantidade de finos que o alburno. Na durabilidade mecânica foi possível verificar que briquetes produzidos com menor temperatura apresentaram maior teor de finos.

TABELA 8 - DURABILIDADE MECÂNICA DE BRIQUETES DE ALBURNO E CERNE DE *Schizolobium parahyba*

| TRATAMENTO           | ALBURNO<br>(% de fins gerados) | CERNE<br>(% de fins gerados) |
|----------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1. (P1000 T100 P60)  | 2,73                           | 2,46                         |
| 2. (P1600 T100 G60)  | 3,56                           | 2,11                         |
| 3. (P1000 T160 G60)  | 2,50                           | 1,45                         |
| 4. (P1600 T160 G60)  | 0,89                           | 0,71                         |
| 5. (P1000 T130 G40)  | 2,44                           | 1,48                         |
| 6. (P1600 T130 G40)  | 3,54                           | 1,61                         |
| 7. (P1000 T130 G80)  | 4,42                           | 2,26                         |
| 8. (P1600 T130 G80)  | 2,50                           | 3,52                         |
| 9. (P1000 T100 G40)  | 2,30                           | 1,81                         |
| 10. (P1300 T160 G40) | 1,83                           | 1,26                         |
| 11. (P1300 T100 G80) | 5,01                           | 8,33                         |
| 12. (P1300 T160 G80) | 4,81                           | 1,34                         |
| 13. (P1300 T130 G60) | 2,40                           | 1,84                         |

FONTE: O autor (2019)

LEGENDA: P: pressão; T: temperatura; G: granulometria

Todavia, assim como na resistência a compressão, a temperatura se mostrou diretamente proporcional a durabilidade mecânica dos briquetes. Tratamentos com maior temperatura (3, 4 e 10) geraram um menor percentual de fins, tanto em cerne quanto em alburno, portanto mais resistentes. Em termos absolutos, para o alburno, o tratamento que mais gerou fins (12) para o que gerou menos (4) mostrou um valor de acréscimo de 82% no teor de fins. Enquanto que no cerne a diferença entre o tratamento que mais gerou fins (11), para o que gerou menos (4) foi de 91% na geração de fins. Esse fato de tratamentos com maior temperatura gerarem um menor percentual de fins pode ser explicado pelo mesmo motivo da resistência a compressão, da qual trata-se da transição vítrea da lignina, que quando submetida a altas temperaturas, tende a amolecer atuando como um ligante natural, e assim que resfria volta a ter um aspecto enrijecido. Dessa forma, a lignina deixa os briquetes mais resistentes e menos friáveis. No entanto, os tratamentos 5 e 9, (que apresentaram maior resistência mecânica, os briquetes de alburno foram mais resistentes do que o cerne), o teste de friabilidade apresentou dados que mostram que o alburno foi mais friável que o cerne.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Temperaturas de prensagem mais elevadas resultaram em briquetes com menor quantidade de espaços vazios;
- As variáveis pressão, temperatura e granulometria não influenciaram nas características energéticas, especialmente o poder calorífico e a análise química imediata, dos briquetes;
- Os briquetes de cerne e alburno não apresentaram diferença significativa para o poder calorífico;
- A temperatura foi a variável que mais contribuiu para o adensamento, o que refletiu em uma maior resistência a compressão dos briquetes;
- Os briquetes de cerne foram mais resistentes a compressão, comparado aos briquetes de alburno;
- A aplicação de temperaturas mais elevadas resultou em briquetes menos friáveis tanto de cerne, quanto de alburno.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, G. M. de. *et al.* **Influência de cerne e alborno na densidade básica de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Paricá)**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Belém, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Madeira – Determinação da densidade aparente dos cavacos**, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, 1994.

ASTM. E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. **ASTM International**, 2004.

ASTM. E872-82: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. **ASTM International**, 2013a. Disponível em: <https://books.google.com/books?id=JZBNMwEACAAJ&pgis>. Acesso em: 18 jan. 2019.

ASTM. D1102-84: Standard Test Method for Ash in Wood. **ASTM International**, 2013b.

ASTM. E870-82: Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels. **ASTM International**, 2013c.

AVELAR, N. V. **Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil e para fins energéticos**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 2012.

BARCELLOS, D. C.; MULLER, M. D.; COUTO, L. O. O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, v. 2, 2005. p.141-158.

BELGACEM, M. N.; PIZZI, A. Lignocellulosic fibers and wood handbook. **Scrivener Publishing**, 2016.

BOUJILA, J.; DOLE, P.; JOLY. C.; LIMARE, A. Some laws of a lignin plasticization. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 102, 2006. p.1445-14451.

BHUIYAN, M. R. T.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Wood science and technology**, v.46, 2000. p. 431-436.

BLESA, M. J.; MIRANDA, J. L.; IZQUIERDO, M. T.; MOLINER, R. Curing temperature effect on mechanical strength of smokeless fuel briquettes prepared with molasses. **Fuel**, v. 82, p. 943-947, 2003.

BRAND, M. A. *et al.* Influência da pressão e material nas propriedades de briquetes de biomassa florestal. *In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS*, 1., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2009.

BRITO, J. O. **Estudo sobre a produção de carvão e briquetes de carvão de casca de pinus. Piracicaba, SP.** Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". v. 58.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira.** Editora Nobel: São Paulo, 1991.

CAPOTE, F. G. **Caracterização e classificação de coprodutos compactados da biomassa para fins energéticos.** 71 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia). Programa de Pós-graduação Interinstitucional em Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

CARVALHO, P. E. R. **Paricá *Schizolobium amazonicum*.** Colombo, Paraná. Embrapa Florestas, 2007. (Circular Técnica).

CERQUEIRA, P. H. A. *et al.* Análise dos resíduos madeireiros gerados pelas serrarias do município de Eunápolis – BA. **Floresta e ambiente**, Seropédica, v.19, n. 4, 2012. p. 506-510.

COSTA, A. C. S. *et al.* Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência da madeira**, v.8, n.1, 2017. p. 10-20.

COSTA, E. V. S. *et al.* Influência da torrefação na propriedade dos briquetes produzidos com madeira de *Eucalyptus* sp. *In: II CONGRESSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA*, 2017. Belo Horizonte. Disponível em: <file:///C:/Users/victo/Downloads/InfluenciadaTorrefao.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2019.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; COSTA JR., D. S. Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 79, p. 225-234, 2014.

FELFLI, F. F.; LUENGO, C. A.; ROCHA, J. C. Briquetes torreficados: viabilidade técnico-econômica e perspectivas no mercado brasileiro. *In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 5., 2004. Campinas. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022004000100035&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022004000100035&lng=en&nrm=abn). Acesso em: 3 jan. 2019.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. **Walter de Gruyter Publisher**, New York, 1989. 613 p.

FERNANDEZ, B. O. *et al.* Qualidade de briquetes de cana-de-açúcar produzidos com aglutinante amido de milho. **Revista virtual de química**, v.10, n.1, p 142-154, 2018.

FERREIRA, G. **Viabilidade técnica da produção de pellets de resíduos de madeira das espécies *Dinizia excelsa* Ducke e *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. para fins energéticos**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.

FONTE, A. P. N.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; ANJOS, R. A. M, dos. Propriedades físicas e químicas da madeira de cerne e alburno de *Cryptomeria japonica*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 16, n. 3, 2017. p. 277-285.

FONTES, P. J. P. de.; QUIRINO, W. F.; PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S. M. S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: DPQ/IBDF, 1984.

FREITAS, A. J. *et al.* Efeitos da pressão e tempo de compactação nas propriedades de briquetes de resíduos madeireis de Paricá. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 6, p. 380-385, 2016.

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

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. *In*: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Ed.). **Lignins**, New York: Wiley Interscience, 1971. p. 241–266.

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

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia e briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, 2009. p. 657-661.

GOUVÊA, A. F. G. *et al.* Estudo da adição de Lignina Kraft nas propriedades mecânicas dos briquetes de resíduos da indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 3, 2017. p. 1029-1036.

IRVINE, G. The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis. **Journal Tappi**, v. 67, n. 5, 1984. p.116-121.

LOPPINET-SERANI, A. *et al.* Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, 2011. p. 298-307.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization. **Applied Energy**, v. 135, 2014. p.182-191.

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

KLITZKE, R. J. *et al.* Caracterização dos lenhos de cerne, alburno e transição de jatobá (*Hymenaea* sp.) visando ao agrupamento para fins de secagem convencional. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, 2008. p. 279-284.

KOLLMANN, F. Wood technology and its applications. **Tomo I. Inst. For. de Invest. y Exp. y el Serv. de la Mad.** Madrid, 1959. 1050 pp.

KONISHI, P. A. *et al.* Influência de Diferentes Condições de Armazenamento nas Propriedades Físico-Mecânicas de Briquetes. **Revista Virtual de Química**, v.9, 2017. Disponível em: <http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/KonishiNoPrelo.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2019.

LUCENA, D. A. *et al.* Aglomeração de moinha de carvão em alto-forno e geração de energia. **Tecnologia em Metalúrgica e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 4, p.1 - 6, 2008.

MARIANI, S. *et al.* Effects of Eucalyptus nitens heartwood in kraft pulping. **Tappi J.** v.4, 2006.

MILLER, R. B. Structure of wood. In: USDA/FPL. **Wood handbook**, Madison, 1999. p. 21-24.

MODES, K. S. *et al.* Caracterização morfológica e química da madeira de *Schizolobium amazonicum* aos 14 anos de plantios no estado de Rondônia. **Scientia forestalis**, v. 46, 2018. p. 271-283.

NEVES, T. A. *et al.* Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2010. 199 p.

OLIVEIRA, J.T.S. *et al.* Influência dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Árvore**, 2005, v. 29, n. 5, p. 819-826.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

PAES, J. B. *et al.* Efeito dos extrativos e cinzas na resistência natural de quatro madeiras a cupins xilófagos. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 399-405, 2013.

PAULA, J. C. M de. **Aproveitamento de resíduos de madeira para confecção de briquetes**. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

- PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- PEREIRA, A. P.; MELO, C. F. M.; ALVES, S. de M. O paricá (*Schizolobium amazonicum*): características gerais da espécie e suas possibilidades na indústria de celulose e papel. **Silvicultura em São Paulo**, v. 16A, n. 2, p. 1340-1344, 1982.
- PEREIRA, B, L.C. *et al.* Correlação entre cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.
- PÉREZ, R. M. *et al.* Calorific value and inorganic material of tem Mexican wood species. **Wood Research**, Bratislava, 2014. p. 281- 292..
- PHILIPP, P. Celulose e Papel - Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica. 2. ed. **Escola SENAI**, v. 1, p. 76-91, 1988.
- PIMENTA, A. S. *et al.* Utilização de resíduos de coco (cocos nucifera) carbonizado para produção de briquetes. **Ciência Florestal**, v. 25, 2015. p. 137-144.
- PINTO, A. A. S. *et al.* Caracterização de pellets de ponteira de eucalipto. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, 2015. p. 232-236.
- PONCSÁK, S. *et al.* Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, v. 40, p. 647-663, 2006.
- PROTÁSIO, T. P. *et al.* Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, 2012. p. 1252–1258.
- PROTÁSIO, T. P. *et al.* Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de florestal plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, 2014. p.111-123.
- PROTÁSIO, T. P. *et al.* Caracterização energética de pellets in natura e torrificados com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, 2015. p. 435-442.
- QUIRINO, W. F. *et al.* Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulosicos. **Revista da Madeira**, 2005. p.101-106.
- QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**, 2002. Disponível em: <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2019.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: IBAMA / LPF- Laboratório de Produtos Florestais, 1991. (Série Técnica, n.13).

REIS, A. A. *et al.* Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, 2012. p. 277-290.

REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. Projeto Madeira do Rio Grande do Sul. **Sellowia**, n. 34-35, 1983. 525 p.

RIEGEL, I. *et al.* Análise Termogravimétrica da Pirólise da Acácia-Negra (*Acacia mearnsii* de Wild.) Cultivada no Rio Grande do Sul, Brasil. **Árvore**, v. 32, n. 3, p.533-543, 2008.

RODRIGUES, G. S. *et al.* Produção de briquetes para queima utilizando finos da produção de carvão vegetal e glicerina. **Holos**, v. 1, 2017. p. 325-335.

ROSA, L. DOS S.; PINHEIRO, K. A. O. Propagação vegetativa de estacas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber Ex. Ducke) obtidas de material juvenil e imersas em ácido indol-3- butírico. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 35, p. 79-88, 2001.

ROSSI, L. M. B. *et al.* Aspectos silviculturais e socioeconômicos de uma espécie de uso múltiplo: o caso de *Schizolobium amazonicum* (Hub.) Ducke. *In*: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 8., 2001 Nova Prata. **Anais...** Nova Prata: Prefeitura Municipal; Santa Maria: UFSM, 2001. p. 271-279. 1 CD-ROM

SANTOS, R. C. *et al.* Correlação entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, 2011. p. 221-230.

SILVA, D. A. da. *et al.* Ponto de amostragem ao longo do fuste para estimativa do poder calorífico da madeira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, 2012. p. 1588- 1595.

SILVA, J. J. N. *et al.* Caracterização Tecnológica da Madeira de *S. amazonicum* para produção de celulose *kraft*. **Ciência da Madeira**, v. 4, p. 33-45, 2013.

SINGH, R. *et al.* Lignin-carbohydrate complexes from sugarcane bagasse: Preparation, purification, and characterization. **Carbohydrate Polymers**, v. 62, p. 57-66, 2005.

SIQUEIRA, H. F, de. **Efeito de aditivos na qualidade de pellets de madeira para uso energético**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

SIVONEN, H. *et al.* Magnetic resonance studies of thermally modified wood. **Holzforschung**, v. 56, n. 6, 2002. p. 648-653.

SOUSA, C.R. de. *et al.* **Paricá**: *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke) Barneby. Colombo, Paraná. Embrapa Amazônia Ocidental, 2003. 12 p. (Circular Técnica).

STADLER, K.; BALBINOT, R.; SCHIMER, W. N.; V, S. C. Análise do processo produtivo e geração de resíduos em uma indústria de painéis compensados. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 6, 2009. p. 45-55.

STELTE, W. *et al.* Pelletizing properties of torrefied spruce. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, 2011. p. 4690- 4698.

TABARÉS, J. L. M. Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (Briquetts). **Fuel**, v. 79, 2000. p. 1229-1237.

TAPPI. **T204 cm-97**: Solvent extractives of wood and pulp, 2007. Disponível em: <http://www.tappi.org/content/sarg/t204.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2020.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. **Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais**. In: TECNOLOGIAS APLICADAS AO SETOR MADEIREIRO III. Rio Branco: Suprema, 2008. p.195-241.

VIDAURRE, G. B. *et al.* Propriedades energéticas da madeira e do carvão de Paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Árvore**, v. 36, n. 2. Viçosa, MG, 2012.

WIKBERG, H.; MAUNU, S. L. Characterization of thermally modified hard and softwoods by <sup>13</sup>C CPMAS NMR. **Carbohydrate Polymers**, v. 58, 2004. p. 461-466.

YAMAN, S. *et al.* Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. **Fuel Processing Technology**, v. 68, 2000. p. 23-31.

YANG, H. *et al.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**. v. 86, 2007. p. 1781-1788.