

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Angelo Fernando de Oliveira Saccol

**APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FLORESTAL NA  
FABRICAÇÃO DE BRIQUETES**

Santa Maria, RS  
2017

**Angelo Fernando de Oliveira Saccol**

**APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FLORESTAL NA FABRICAÇÃO DE  
BRIQUETES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Cristiane Pedrazzi

Santa Maria, RS  
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

de Oliveira Saccol, Angelo Fernando  
APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FLORESTAL NA FABRICAÇÃO DE  
BRIQUETES / Angelo Fernando de Oliveira Saccol.- 2017.  
64 p.; 30 cm

Orientadora: Cristiane Pedrazzi  
Coorientador: Jorge Farias  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2017


1. Propriedades Químicas da Madeira 2. Propriedades  
Físicas e Mecânicas da Madeira 3. Energias Renováveis 4.  
Briquetagem I. Pedrazzi, Cristiane II. Farias, Jorge  
III. Título.

Angelo Fernando de Oliveira Saccol

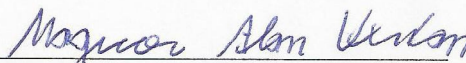
**APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FLORESTAL NA FABRICAÇÃO DE  
BRIQUETES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**.

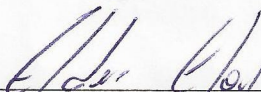
**Aprovado em 20 de Fevereiro de 2017:**



**Prof.ª Dr.ª Cristiane Pedrazzi**  
(Presidente/Orientadora)



**Magnos Alan Vivian, Dr. (UFSC)**



**Elder Eloy, Dr. (UFSM-FW)**

Santa Maria, RS  
2017

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me guiado com calma e sabedoria para vencer todos os obstáculos e tarefas do caminho, para que eu pudesse alcançar mais um objetivo traçado na vida.

Às pessoas mais importantes da minha vida, as quais nunca mediram esforços para que todos NOSSOS sonhos se realizassem. Meus pais: Angelo e Sonia Saccol! Obrigado pelos mais valiosos ensinamentos, pela minha formação de caráter e por serem meu maior exemplo de dedicação e conduta, tanto no dia a dia, quanto na vida profissional.

À minha querida orientadora, Cristiane Pedrazzi, pela paciência gigantesca, empenho, dedicação e bom humor de sempre. Fatores que fizeram com que esta caminhada se tornasse leve, diante dos contratempos passados. Meu muito obrigado pela parceria e por ser esta pessoa maravilhosa e admirável profissional. Obrigado sempre!

Aos meus dedicados colegas de laboratório: Rodrigo (mentor maior do desenvolvimento deste trabalho. Sem palavras, meu amigo!), Bruna, Marina, Fernanda, Camila (minhas queridas colegas de conhecimento tão preciso e delicado), André, Anderson e Henrique (obrigado pela ajuda). Todos queridos amigos e grandes colegas que sempre estiveram prontos para as mais diversas situações, discussões, troca de conhecimento. Obrigado principalmente por me presentarem com o grande tesouro chamado AMIZADE. Mil *gracias*, pelo convívio nestes anos!

Aos meus familiares, amigos e a todas as pessoas que de forma direta e indireta torceram e/ou acreditaram que esta conquista seria possível. Muito obrigado, de coração!

Ao professor Jorge Farias pela coorientação nos primeiros passos desta caminhada.

À empresa Celulose Rio Grandense (CMPC) por disponibilizar todo material de pesquisa e acreditar na linha de tecnologia de produtos florestais como um somatório de conhecimento na busca do sucesso.

À Embrapa Florestas (Colombo, PR), na pessoa do Senhor Edson Alves de Lima, pela parceria e dedicação para que juntos pudéssemos realizar este trabalho.

À banca examinadora. Obrigado Elder Eloy e Magnos Vivian por dedicarem tempo a este trabalho.

À cidade de Santa Maria, pela acolhida em busca de um novo amanhã.

## RESUMO

### APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FLORESTAL NA FABRICAÇÃO DE BRIQUETES

AUTOR: Angelo Fernando de Oliveira Saccol  
ORIENTADORA: Cristiane Pedrazzi

A biomassa pode ser utilizada em diversas formas e estados para obtenção das mais variadas formas de energia seja por conversão direta ou indireta. O objetivo desse estudo foi avaliar a viabilidade técnica do uso de diferentes classes de resíduos florestais, provenientes de empresas de papel e celulose, para a fabricação de briquetes. As classes de resíduos florestais foram classificadas como: serragem e palitos de madeira (classe 1), cascas e folhas (classe 2), cavacos e lascas de madeira (classe 3), todos resíduos de *Eucalyptus spp.*, e cascas de *Pinus taeda* (classe 4). Os briquetes foram produzidos utilizando diferentes classes de resíduos florestais, totalizando 10 tratamentos: 4 tratamentos contendo 100% de cada classe de resíduos e 6 tratamentos formulados em proporções de 50-50% de cada classe. As condições empregadas para fabricação dos briquetes foram: pressão de 100 bar, temperatura de 120° +/- 5°C, tempo de prensagem de 3 minutos e tempo de resfriamento de 5 minutos. Além da caracterização química dos diferentes resíduos, foram determinados outros parâmetros que influenciam diretamente na qualidade dos briquetes, tais como: poder calorífico superior, análise termogravimétrica, resistência a compressão e densidades aparente, a granel e energética. A classe de resíduos 4 apresentou os maiores teores de extrativos totais e de lignina quando comparada as demais classes estudadas. Avaliando as densidades aparente e energética dos briquetes, pode-se observar que todos os 10 tratamentos tiveram resultados semelhantes, onde a densidade aparente se manteve na média dos 1148,20 Kg/m<sup>3</sup> e a densidade energética em 4108,92 MJ/m<sup>3</sup>. As análises de poder calorífico superior mostraram resultados de pouca variação entre os tratamentos tendo maior expressão nos tratamentos 4 e 10, com valores de 4631,94 Kcal/Kg e 4497,07 Kcal/Kg, respectivamente. Os briquetes produzidos pelos 10 tratamentos apresentaram carga de ruptura média de 525,1Kgf, sendo os dos tratamentos 2 e 8 os mais resistentes, obtendo valores de 654Kgf e 610Kgf, respectivamente. Através dos resultados obtidos nas diversas análises e avaliações, pode-se constatar que os briquetes em que as formulações continham a Classe 4 de resíduo foram os que apresentaram melhor qualidade para poder energético, porém para fins de armazenamento e durabilidade do produto final, em escala laboratorial, os tratamentos com resultados mais satisfatórios foram os tratamentos 2 e 8.

**Palavras-chave:** Biomassa Florestal. Briquetes. Energia Renovável.

## ABSTRACT

### UTILIZATION OF FOREST BIOMASS IN BRIQUETTES MANUFACTURED

AUTHOR: Angelo Fernando de Oliveira Saccol

ADVISOR: Cristiane Pedrazzi

Biomass can be used in several ways to obtain the most diversify forms of energy, either by direct or indirect conversion. The aim of this work was to evaluate the technical viability of the use of different classes of forest residues from pulp and paper industries to produce briquettes. The classes of forest residues were classified as: sawdust and wooden sticks (class 1), litter (class 2), woodchips and chips (class 3), all residues of *Eucalyptus spp.*, and *Pinus taeda* barks (class 4). The briquettes were manufactured using different classes of forest residues, totalizing 10 treatments: 4 treatments containing 100% of each class of residue and 6 treatments formulated in a 50-50% proportion of each class. The conditions used for the production of briquettes were: 100 bar pressure, temperature of 120° +/- 5°C, pressing time of 3 minutes and cooling time of 5 minutes. Besides the chemical characterization from the different residues, some other parameters that directly influence the briquettes quality were determined, such as: superior calorific value, thermogravimetric analysis, compressive strength and apparent, bulk and energetic densities. Through the chemical analysis, it can be observed that the residues class 4 presented the highest content of extractives and lignin when compared to the other studied classes. Evaluating the apparent and energetic densities of briquettes, it can be seen that all the 10 treatments had results without much variation between the values, where the apparent density remained in the average of 1148.20 Kg / m<sup>3</sup> and the energy density in 4108,92 MJ / m<sup>3</sup>. The superior calorific value analysis results showed a low variation between the treatments, with a higher expression in treatments 4 and 10, with values of 4631.94 Kcal / kg and 4497.07 Kcal / kg, respectively. The briquettes produced by the 10 treatments had a mean burst load of 525.1Kgf, and the treatments 2 and 8 were the most resistant during the mechanical tests, obtaining values of 654Kgf and 610Kgf, respectively. Through the results obtained by the various analysis and evaluations, it can be seen that the briquettes in which formulations had the class of residue 4 were the ones that presented a better quality for energetic power, however, for the purpose of storage and durability of the final product, in a laboratorial scale, the treatments with the most satisfying results were the treatments 2 and 8.

**Key-words:** Forest Biomass. Briquettes. Renewable Energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biomassa Florestal.....	19
Figura 2- Biomassa Florestal para Produção de Energia.....	21
Figura 3 - Caldeira de Biomassa.....	22
Figura 4 - Briquetes Produzidos com Resíduos Madeireiros. ....	25
Figura 5 - Diferentes Formatos de Briquetes Produzidos em Briquetadeiras. ....	28
Figura 6 - Amostras dos resíduos florestais identificados como classes 1, 2, 3 e 4, conforme as espécies, local de coleta nas empresas e composição da biomassa.....	31
Figura 7 - Pesagem do material para calculo de densidade à granel. ....	32
Figura 8 - Análise de materiais voláteis. ....	33
Figura 9 - Determinação do poder calorífico dos resíduos florestais: Amostras (A); Cadinho metálico onde as amostras foram colocadas para a realização da análise (B); Bomba adiabática IKA C5000 (C).....	35
Figura 10 - Briquetadeira laboratorial modelo LB 32. ....	36
Figura 11 - Briquetes em condições desejáveis.....	37
Figura 12 - Processo de fabricação dos briquetes: (A) Capsula de compactação; (B) Pistola de ar. ....	38
Figura 13 - Preparação das proporções das amostras das classes de resíduos florestais para confecção dos briquetes.....	39
Figura 14 - Análise visual dos briquetes. ....	39
Figura 15 - Medições de diâmetro (A) e massa (B) dos briquetes. ....	40
Figura 16 - Ensaio mecânico para a determinação da resistência a compressão dos briquetes. ....	42
Figura 17 - Curva termogravimétrica da classe de resíduo florestal composto por serragem e palitos de madeira de <i>Eucalyptus spp</i> .....	47
Figura 18 - Curva termogravimétrica da classe de resíduo florestal composto por cascas e folhas de <i>Eucalyptus spp</i> . ....	48
Figura 19 - Curva termogravimétrica da classe de resíduo florestal composto por cavacos e lascas de madeira de <i>Eucalyptus spp</i> .....	48
Figura 20 - Curva termogravimétrica da classe de resíduo florestal composto por casca de <i>Pinus taeda</i> . ....	49



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos resíduos florestais conforme local de coleta nas empresas, espécies e composição da biomassa. ....	30
Tabela 2 - Procedimentos analíticos para caracterização química das diferentes classes de resíduos florestais. ....	32
Tabela 3 – Testes de condições preliminares de fabricação com variação de pressão, temperatura, tempos de prensagem e de resfriamento para confecção dos briquetes. ....	36
Tabela 4 - Tratamentos empregados para a confecção dos briquetes em função das classes de resíduos florestais. ....	38
Tabela 5 - Teor de umidades das classes de resíduos florestais. ....	43
Tabela 6 - Valores médios da densidade a granel dos tratamentos com os resíduos e suas misturas empregados para a fabricação de briquetes.....	44
Tabela 7 - Valores médios da composição química das classes de resíduos florestais .....	45
Tabela 8 - Valores médios de análise química imediata .....	46
Tabela 9 - Valores médios de poder calorífico superior (PCS) dos tratamentos em função dos resíduos florestais empregados para a confecção dos briquetes.....	50
Tabela 10 - Valores médios das densidades aparentes, energética e estabilizada dos briquetes produzidos pelos diferentes tratamentos.....	52
Tabela 11 - Valores médios dos ensaios mecânicos dos briquetes.....	53
Tabela 12 - Teor de Umidade .....	57
Tabela 13 - Teor de Lignina .....	57
Tabela 14 - Poder Calorífico .....	58
Tabela 15 - Densidade Aparente .....	58
Tabela 16 - Resistência à Compressão .....	59

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - ANOVA para dados de teor de umidade dos resíduos florestais. ....	54
Quadro 2 - ANOVA para os dados do teor de lignina dos resíduos florestais. ....	55
Quadro 3 - ANOVA para os dados de poder calorífico superior dos resíduos florestais. ....	55
Quadro 4 - ANOVA para os dados de densidade aparente dos resíduos florestais. ....	56
Quadro 5 - ANOVA para os dados de resistência a compressão dos resíduos florestais. ....	56

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	9
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	10
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 OBJETIVO .....	14
1.1.1 Objetivo Geral .....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	16
2.1. ENERGIA RENOVÁVEL .....	16
2.2 BIOMASSA FLORESTAL.....	18
<b>2.2.1 Biomassa Florestal nas Indústrias de Papel e Celulose para Produção de Energia</b>	21
2.3 PRODUÇÃO DE BRIQUETES .....	24
2.3.1 Características dos briquetes.....	24
2.3.2 Parâmetros da briquetagem .....	26
2.3.3 Propriedades dos briquetes .....	28
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	30
3.1. MATERIAIS .....	30
3.2. MÉTODOS .....	31
<b>3.2.1. Caracterização dos resíduos florestais</b> .....	31
3.2.1.1 <i>Teor de umidade</i> .....	31
3.2.1.2 <i>Densidade à granel</i> .....	32
3.2.1.3 <i>Propriedades químicas</i> .....	32
3.2.1.4 <i>Análise química imediata</i> .....	33
3.2.1.5 <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i> .....	34
3.2.1.6 <i>Poder calorífico</i> .....	34
<b>3.2.2 Confecção dos briquetes</b> .....	35
3.2.2.1 <i>Análises visuais da qualidade dos briquetes</i> .....	39
3.2.2.2 <i>Determinação das densidades aparente e energética dos briquetes</i> .....	40
3.2.2.3 <i>Resistência à compressão</i> .....	41
<b>3.2.3 Análise estatística</b> .....	42
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	43
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS FLORESTAIS .....	43
4.1.1 <b>Teor de Umidade</b> .....	43

<b>4.1.2 Densidade a granel</b> .....	43
<b>4.1.3 Propriedades químicas</b> .....	45
<b>4.1.4 Análise química imediata</b> .....	46
<b>4.1.5 Análise Termogravimétrica (TGA)</b> .....	47
<b>4.1.6 Poder calorífico</b> .....	50
<b>4.2 DENSIDADES APARENTE E ENERGÉTICA DOS BRIQUETES</b> .....	52
<b>4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BRIQUETES</b> .....	53
<b>4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA</b> .....	54
<b>4.4.1 Teor de Umidade</b> .....	54
<b>4.4.2 Teor de lignina</b> .....	55
<b>4.4.3. Poder Calorífico</b> .....	55
<b>4.4.4. Densidade Aparente</b> .....	56
<b>4.4.5. Resistência a Compressão</b> .....	56
<b>4.4.6. Testes de Média</b> .....	57
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	60
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	61

## 1. INTRODUÇÃO

A biomassa pode ser utilizada em diversas formas e estados para obtenção das mais variadas formas de energia seja por conversão direta ou indireta. Como vantagens da utilização da biomassa em substituição aos combustíveis fósseis podemos citar a menor poluição atmosférica global e localizada, estabilidade do ciclo de carbono e maior emprego de mão de obra. Em relação a outros tipos de energias renováveis, a biomassa, sendo energia química, se destaca pela alta densidade energética e pelas facilidades de armazenamento, conversão e transporte (SAAD, 2010).

Historicamente, a biomassa florestal constitui-se em um importante insumo energético para a humanidade, principalmente naqueles países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. A valorização da biomassa como insumo energético moderno surgiu na década de 70 com as crises do petróleo (1973 e 1979). Na ocasião a biomassa passou a ser considerada como uma alternativa viável para atendimento às demandas por energia térmica e de centrais elétricas de pequeno e médio porte (MÜLLER, 2005).

De acordo com Benedetti et al. (2009), o Brasil reúne condições técnicas e econômicas ideais para desenvolver e aproveitar as tecnologias de utilização de biomassas para fins energéticos, por ser privilegiado em termos de extensão territorial e por reunir condições favoráveis de insolação e água, fatores essenciais para a produção de biomassa em grande escala. A biomassa é, sem dúvida, uma importante fonte de energia para o Brasil, constituindo alternativa inteligente ao petróleo, que é caro e deve ser utilizado para fabricação de produtos químicos nobres.

Os resíduos florestais, apesar de serem mais difíceis de se coletar, não devem ser desprezados, pois eles poderão contribuir quando os resíduos industriais não forem suficientes para satisfazer às necessidades energéticas ou poderão diversificar as fontes de renda da empresa, através da venda do excedente energético (MIGLIORINI, 1980).

A indústria de base florestal, como um todo, tem por característica a geração de um grande volume de resíduos ao longo do processo produtivo. O setor madeireiro apresenta um grande potencial para o aproveitamento de resíduos, já que as perdas são inerentes ao processo produtivo, representando 40 a 70% do volume da matéria prima. Estes resíduos são provenientes da colheita e do beneficiamento da madeira e por muito tempo, não tiveram destinação adequada (BOUNDELLE; CHIES; MARTINS, 2002). De acordo com Soares et al. (2006), as indústrias de papel e celulose, por exemplo, apresentam interessantes perspectivas para a produção combinada de energia elétrica e calor útil, tendo em vista suas

relações de demanda de eletricidade e vapor de baixa/média pressão e a disponibilidade de combustíveis residuais de processo, como o licor negro e as cascas e resíduos de biomassa.

Assim, a transformação da biomassa florestal num recurso de fácil utilização deve ser considerada como fato essencial para a sua disseminação como um combustível viável. A mobilização das novas tecnologias de transformação de lenhas, resíduos lenhosos, industriais e agrícolas num produto de fácil manuseio, transporte, armazenamento e utilização, constitui um fator fundamental para o melhor uso da biomassa como alternativa aos combustíveis fósseis (SANTOS; COLODETTE; QUEIROZ, 2013).

A briquetagem é uma forma eficaz de aproveitar os resíduos de biomassa (SUAREZ, 2003 apud FELFLI; LUENGO; ROCHA, 2004). Entretanto, constata-se que os briquetes de biomassa ainda não são amplamente comercializados no mercado brasileiro, principalmente para consumo doméstico. Expandir este mercado é um desafio técnico e mercadológico, que deve responder, em primeiro lugar, ao desenvolvimento de briquetes de alto padrão de qualidade. Com isso, se tem um biocombustível sólido em forma de briquete com a função de suprir as necessidades energéticas da indústria.

De acordo com Vilas Boas (2011), a qualidade dos briquetes é influenciada pelas características físicas e químicas da matéria prima e também pelos parâmetros de produção, principalmente as condições de briquetagem. A produção de briquetes apresenta diversas vantagens, destacando-se a redução do volume dos resíduos associado ao menor custo de transporte e armazenamento e ao aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume.

Sendo assim, o uso de resíduos florestais como matéria prima para a fabricação de briquetes representa uma fonte de energia alternativa em processos industriais, apresentando vantagens quando comparada aos combustíveis fósseis, além de promover a redução de resíduos sólidos gerados nessas indústrias e incentivar as políticas públicas ao consumo de energias limpas.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação técnica do uso de resíduos florestais, provenientes de indústrias de papel e celulose, para produção de briquetes apresentando as empresas de papel e celulose uma nova alternativa de produção de energia

para o processo industrial, assim como um novo destino para os resíduos florestais gerados por elas.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar quimicamente os resíduos obtidos em plantios florestais e no pátio de madeira de indústrias de papel e celulose;
- Determinar a partir de ensaios preliminares, os parâmetros ideais de tempo, temperatura e pressão para a briquetagem desses resíduos;
- Produzir briquetes com os resíduos florestais puros e misturados na proporção 1:1 em escala laboratorial;
- Avaliar as propriedades físico-químicas e mecânica dos briquetes produzidos;

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. ENERGIA RENOVÁVEL

A exploração dos recursos naturais, poluição da atmosfera e degradação do solo tomaram maior proporção a partir do início do século XX, causando, de forma desenfreada, sérios danos ao planeta Terra. Fontes de energia consideradas tradicionais, como o petróleo e o carvão, são recursos que já começam a se esgotar. Outras fontes, como a energia nuclear, nos alerta ao perigo de seus resíduos. A abusiva extração e uso destas fontes, traçam uma trajetória de declínio, sendo uma ameaça ao meio ambiente (DEVES; FRANCIO, 2007).

Segundo Foelkel (2016, p.32),

O mundo está vivendo um momento de transição de modelos econômicos e industriais. Existem inúmeros cenários possíveis e muitas visões de futuro. Esses modelos precisam dar certo, mas para que eles vingam há necessidade de se reinventar a indústria e os consumidores também.

Nos dias atuais, vivemos uma constante preocupação em relação à sustentabilidade e a geração de energia, abrangendo os mais diversos setores de produção do Brasil. O crescimento da população e o aumento pela demanda dos mais diversos produtos do mercado, faz com que inúmeras técnicas e matérias primas de produção, sofram considerável escassez, principalmente no que diz respeito a geração de energia. Diversos países que buscam desenvolvimento contínuo e aqueles que já alcançaram esta meta, hoje, utilizam fontes de energias renováveis, com o intuito de colaborarem para o menor impacto ambiental e melhorar a qualidade de vida (FOELKEL, 2016).

Segundo Deves e Francio (2007), as fontes renováveis de energia terão participação cada vez mais relevante na matriz energética global nos próximos anos e podem ser classificadas como:

1) Energia Solar: é a energia da radiação solar direta, praticamente inesgotável, que pode ser aproveitada de diversas formas através de diversos tipos de conversão, como painéis solares e células fotovoltaicas, permitindo seu uso em aplicações térmicas em geral, obtenção de força motriz diversa, obtenção de eletricidade e de energia química. Este tipo de recurso é estimulado no nosso país pela abundante quantidade de sol.

2) Energia Eólica: é a energia gerada pelo vento. É utilizada há anos, sob a forma de moinhos de vento; pode também ser canalizada por modernas turbinas eólicas ou pelo



tradicional cata-vento. Os cata-ventos e embarcações a vela são formas bastante antigas de seu aproveitamento.

3) Hidroenergia: é aquela que utiliza a força cinética das águas de um rio e a transforma em energia elétrica, através da rotação de uma turbina. Sua utilização é bastante antiga e uma das formas mais primitivas é o monjolo e a roda d'água.

4) Biomassa: é a energia química produzida pelas plantas na forma de hidratos de carbono através da fotossíntese. Plantas, animais e todos os seus derivados são biomassa. Existem três classes de biomassa: a biomassa sólida, líquida e gasosa.

Segundo Goldemberg (1998 apud Gentil 2008, p. 6),

Biomassas são produtos vivos ou mortos e seus descartes de origem animal ou vegetal. São considerados biomassa para fins energéticos: culturas e descartes das lavouras, restos florestais, esterco de animais domésticos, esgotos urbanos, descartes lignocelulósicos, lixo doméstico, formações como turfa, descartes do consumo humano, descartes de graxaria de matadouros, descartes madeireiros das indústrias ou descarte do consumo industrial como caixas, embalagens ou material de construção que seja combustível.

Como combustível, a biomassa apresenta grandes possibilidades para pesquisa e utilização, pois as formas tradicionais (lenha e carvão vegetal) estão cedendo espaço à biomassa moderna (biocombustíveis de 1ª geração, formas mais eficientes de geração e cogeração de bioenergia), como bioálcool, biodiesel, bio-hidrogênio. Contudo, na segunda geração de biocombustíveis, obtidos por meio do aproveitamento de resíduos agrícolas, industriais, urbanos ou outros insumos não convencionais, com grande aporte tecnológico, espera-se um grande rendimento energético por área e baixos impactos ambientais (HALL et al., 2005; MUNDIM, 2006; VIGUIRISTI, 2008).

Por essa razão é que existem milhares de experimentos acontecendo em termos de buscar inovações a partir dos materiais lignocelulósicos produzidos por florestas de eucaliptos, bambu, capim elefante, cana-de-açúcar, etc. Todos esses vegetais são grandes produtores de biomassa, desde que encontrem as condições requeridas para que isso venha a ocorrer (FOELKEL, 2012).

Segundo Foelkel (2016), atualmente, frente às inúmeras oportunidades para as biomassas, elas já passaram a ser divididas tecnicamente em grupos. Um desses grupos diz respeito ao nível de complexidade das tecnologias a elas agregadas. Assim, as biomassas podem ser de dois tipos:

1) Biomassa e biomateriais de primeira geração: são os açúcares, amido e óleos vegetais que são extraídos com facilidade das plantas e podem ser facilmente convertidos em

biocombustíveis (bioetanol e biodiesel) e biomateriais (alimentos, produtos químicos, óleos essenciais, taninos, etc.).

2) Biomassa e biomateriais de segunda geração: são os materiais derivados da clivagem dos compostos lignocelulósicos mais complexos da biomassa, como os polímeros: lignina, celulose e hemiceluloses. A celulose e a lignina são os compostos orgânicos mais abundantes na natureza e são encarados como as principais matérias primas para a economia verde.

## 2.2 BIOMASSA FLORESTAL

Segundo Foelkel (2016), entende-se por biomassa todo material biológico não fóssil produzido pelos seres vivos, sejam fungos, algas, árvores, animais, microrganismos, etc. Entretanto, do ponto de vista aplicado, biomassa tem sido mais associada ao material fotossintético produzido por plantas, seja na forma de árvores (florestas) ou culturas anuais. A biomassa já representa hoje cerca de 14% da totalidade dos recursos energéticos em uso no País e praticamente 7% da geração da eletricidade. Existem expectativas positivas para que cresça ainda mais rapidamente, em função do estímulo para as plantações florestais para finalidades energéticas e pelo uso da madeira em novos tipos de negócios (biorrefinarias de biomassa), que podem produzir combustíveis sólidos, líquidos e gasosos a partir de qualquer tipo de biomassa vegetal.

Em termos sócio-ambientais, as vantagens da biomassa são inúmeras. Se cultivada de forma sustentável, seu manejo e utilização não acarretam acréscimo de CO<sub>2</sub> à atmosfera, já que o CO<sub>2</sub> liberado pela combustão é extraído da atmosfera durante o processo de fotossíntese. Além disso, sua utilização em larga escala para fins energéticos pode promover desenvolvimento sustentável de áreas rurais e regiões pouco desenvolvidas, reduzindo o êxodo para as áreas densamente urbanizadas (SOARES et al., 2006).

De acordo com Gentil (2008, p. 7),

A biomassa vegetal é resultado da fotossíntese formando carboidrato, portanto produtos com carbono e hidrogênio. Num processo inverso, a combustão é a dissociação deste carboidrato, formando água, dióxido de carbono e energia. Assim, a combustão devolve à natureza, o carbono retirado pela fotossíntese. Neste caso, desde que a queima da biomassa seja associada ao plantio de novas árvores, o balanço de carbono se fecha, ou seja, todo ele é liberado para a natureza pela combustão e sequestrado pelas árvores para a realização da fotossíntese.

Segundo Foelkel (2012), as principais biomassas que estão sendo foco das pesquisas e dos potenciais investidores da bioeconomia são: florestas plantadas de rápido crescimento, florestas naturais de manejo comercial, culturas agrícolas, Algas, resíduos municipais e industriais de natureza orgânica e gramíneas de rápido crescimento. As novas fábricas que operarão essas biomassas para manufatura de bioprodutos e biocombustíveis vêm sendo denominadas de biorrefinarias, em similaridade às refinarias de petróleo. O prefixo bio foi introduzido para indicar que essas fábricas devem ser tão eficientes quanto às refinarias de petróleo, mas usando matérias primas verdes e renováveis de biomassa.

A biomassa florestal (Figura 1) pode ser utilizada como fonte de energia limpa, renovável, e geradora de empregos. O Brasil, embora possua desenvolvida capacitação tecnológica para exploração dos recursos florestais, além de extensa área, relevo, clima e condições biológicas excepcionais para a produção da biomassa florestal, provavelmente o elevado custo de produção seja a explicação para o não aproveitamento da biomassa florestal na geração de eletricidade no país (SOARES FILHO et al.; 2016).

Figura 1 - Biomassa Florestal



Fonte: Foelkel (2016)

A principal aplicação mundial da madeira é no uso energético, tanto plantada como nativa. Dentro deste universo de produtos biomássicos, os descartes florestais, madeireiros ou agrícolas possuem boas condições de combustão pelas suas características químicas,

conforme a análise elementar que mostra valores médios de: 50,8% de carbono, 6,4% de hidrogênio e 41,8% de oxigênio para madeiras não-resinosas. Para as resinosas tem-se: 52,9% de carbono, 6,3% de hidrogênio e 39,7% de oxigênio. A análise macromolecular mostra os seguintes valores médios: teor de celulose de 40% a 45%, hemicelulose de 25% a 30%, lignina de 25% a 35%, extrativos de 2% a 4% e cinzas com teores menores de 0,5% (BRITO; CINTRA, 2004; SUAREZ; LUENGO, 2003 apud GENTIL, 2008).

Como vantagens econômicas da biomassa florestal, podem ser citadas, de acordo com Brasil (1996), as seguintes: nos países em desenvolvimento, é o combustível mais barato, tanto por tonelada quanto por unidade de calor; não necessita de mão-de-obra qualificada, gerando emprego e fixando o homem no campo; seu armazenamento é possível em espaço aberto, apesar de o poder calorífico diminuir com o tempo; e apresenta baixo teor de cinza e enxofre. Por outro lado, a lenha necessita de planejamento para sua utilização, devido ao controle das áreas florestais por instituições ambientais; exige grande contingente de mão-de-obra, elevando os custos nos países onde os salários são altos; e apresenta poder calorífico inferior ao dos combustíveis fósseis.

A biomassa na indústria de energia são os biocombustíveis provenientes de recursos florestais, seus produtos e subprodutos, que incluem basicamente biomassa lenhosa, produzida de forma sustentável a partir de florestas cultivadas, ou ainda originada em atividades que processam ou utilizam a madeira para fins não energéticos, destacando-se as indústrias de papel/celulose e moveleira, bem como as serrarias (BERNI, 2016). Ainda segundo o autor, o conteúdo energético dessa classe de biomassa está associado à celulose e lignina contidas na matéria e seu baixo teor de umidade. Seu aproveitamento no uso final energético realiza-se, principalmente, através de rotas tecnológicas de transformação termoquímica mais simples, como combustão direta e carbonização, embora também haja rotas mais complexas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol, etanol, gases de síntese e licor negro, por exemplo.

A biomassa florestal pode ser uma aposta importante para o sucesso energético do País (Figura 2) e se espera que ela possa representar crescentes oportunidades de negócios, empregos e tributos para a Nação. Para melhores resultados, há que se buscar uma maior integração entre as políticas florestais, industriais, energéticas e sociais, bem como dinamizar a legislação e os processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos (FOELKEL, 2016).

Figura 2- Biomassa Florestal para Produção de Energia



Fonte: Celulose Online (2016).

### **2.2.1 Biomassa Florestal nas Indústrias de Papel e Celulose para Produção de Energia**

Segundo Gouvêa (2012), definem-se como resíduos das indústrias de base florestal, as sobras que ocorrem no processamento mecânico, físico ou químico da madeira, e que não são incorporados ao produto final, sendo sua geração significativa no setor florestal. A geração dos resíduos é consequência natural da transformação da madeira em algum produto florestal, como painéis de madeira, celulose, carvão, móveis etc. Ainda segundo o autor, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) prevê, como uma de suas metas a não-geração, redução, reutilização e tratamento de resíduos sólidos, bem como, destinação final, ambientalmente adequada dos rejeitos.

Dentre os diferentes setores industriais, um que se destaca no uso de biomassa florestal é o setor de fabricação de celulose de mercado ou de papel (fábricas integradas produzindo celulose e papel simultaneamente). Essas fábricas são intensivas no uso de energia, mas em geral possuem alto nível de suficiência própria, pois o licor preto do processo dominante kraft acaba sustentando toda a necessidade em eletricidade e vapor de uma fábrica moderna de celulose de mercado, além de gerar alguma eletricidade excedente para venda. De acordo com o autor, a matriz energética como um todo desse setor no Brasil (todas as fábricas de celulose e papel) registra que mais de 75% da energia consumida deriva de biomassa florestal. As fábricas de celulose de mercado quase não precisam de energia externa; apenas cerca de 1,0 – 1,5 GJ de combustível fóssil comprado/tonelada de celulose produzida (FOELKEL, 2016).

As caldeiras de biomassa (Figura 3) utilizam o resíduo de madeira gerado durante o processo de classificação dos cavacos a serem utilizados no processo de cozimento. A queima deste resíduo permite gerar vapor que se soma ao vapor gerado nas caldeiras de recuperação. Além do licor preto e biomassa outros resíduos de processo gerados pelas indústrias de celulose são incinerados nas caldeiras, como os gases não condensáveis (GNC) que são basicamente compostos reduzidos de enxofre, como o gás sulfídrico, metil mercaptanas, etc. Atualmente já esta se tornando comum a incineração do lodo biológico gerado durante o processo de biodegração da matéria orgânica presente nos efluentes das indústrias de celulose (PEREIRA; NETO, 2011).

Figura 3 - Caldeira de Biomassa



Fonte: Foelkel (2016).

De acordo com Foelkel (2016), dentre os resíduos de biomassa florestal energética que são consumidos pelas fábricas de celulose e papel em suas caldeiras de força para geração de vapor e eletricidade, destacam-se:

- Casca do descascamento de toras;
- Cavacos de dimensões inadequadas aos processos de fabricação de celulose (lascas, serragem, cavacos sobre-espessos, pó de madeira, etc.);

- Palitos e nós resultantes da depuração da celulose não branqueada;
- Lodos primário e secundário biológico da estação de tratamento de efluentes;
- Resíduos de papel que não sejam adequados para reciclagem (contaminados com graxas, óleos, etc.); etc.

Entretanto, o licor preto é definitivamente o grande herói energético das modernas fábricas de celulose kraft. De qualquer forma, a energia de biomassa nas modernas fábricas de celulose de mercado corresponde a mais de 90% da energia total demandada pelas mesmas, ainda sobrando um excedente em eletricidade renovável para venda (FOELKEL, 2016).

A celulose é considerada a fonte biológica natural renovável mais abundante do planeta, por isto, a produção de materiais e bioenergia baseada na matriz lignocelulósica, é importante para o desenvolvimento sustentável do ser humano. A celulose encontra-se nas florestas plantadas, principalmente eucaliptos, na agricultura e nos resíduos agroflorestais. A combustão de material lignocelulósico, a gaseificação, a pirólise e a digestão anaeróbica podem ser direcionadas para diversas aplicações, tais como: a geração de eletricidade, de calor e para o setor de transporte na substituição dos derivados do petróleo (MARLI, 2008 apud PUENTES, 2010).

Com o ímpeto de se substituir os combustíveis de origem fóssil, pelo menos parcialmente, surgiram na última década os conceitos de biorrefinagem e biorrefinaria. Biorrefinagem é definida como o processamento da biomassa em uma gama de produtos comerciais e energia, de maneira sustentável. Biorrefinaria seria a unidade industrial que integra equipamentos e processos de conversão de biomassa, para produzir combustíveis, energia, materiais e produtos químicos (SANTOS; COLODETTE; QUEIROZ, 2013).

Segundo Berni (2016), alguns exemplos de produtos obtidos nas biorrefinarias são: biocombustíveis (etanol e biodiesel), glicerol, lipídeos, óleos, ácidos orgânicos, furfural, isopropanol, vitaminas, polímeros de açúcares e de proteínas, bem como combustíveis intermediários, como o carvão e briquetes.

## 2.3 PRODUÇÃO DE BRIQUETES

### 2.3.1 Características dos briquetes

Em 1848 foi concedida uma patente para William Easby nos Estados Unidos para um método de conversão de carvão miúdo em torrões sólidos, através da pressão. A justificativa de Easby feita há 160 anos para a patente era de que um artigo de pequeno valor, quase desprezível, pode ser convertido em um artigo valioso como combustível para navios a vapor, forjas, culinária e outras finalidades economizando o que agora era perdido (O PROCESSO DE BRIQUETAGEM, 2005 apud GENTIL, 2008).

A palavra *briquette* surgiu em Paris 14 anos após a patente de Easby, sendo uma mistura de turfa, água e argila plástica.

Nas décadas seguintes, o carvão mineral recebeu não só adensamento dos componentes como temperatura para formar um combustível sólido. Os briquetes que tinham aglomerantes eram denominados “pérats”, feitos de carvão betuminoso misturado com alcatrão. Desta época para cá, a tecnologia do briquete de madeira avançou lentamente transformando-se em um biocombustível sólido com apelo ambiental (BROWN COAL AS FUEL, 2005 apud GENTIL, 2008, p. 9).

A produção de briquetes já é bastante conhecida no exterior, principalmente nos EUA e Europa, através da briquetagem de carvão vegetal. No Brasil, não existe uma tradição industrial na produção de briquetes de carvão vegetal ou de resíduos ligno-celulósicos. O alto poder calorífico torna o briquete ideal para uso em caldeiras industriais, fornos de padarias, pizzarias, cerâmicas, lareiras e outros. Com o reaproveitamento dos resíduos como matéria prima na produção dos briquetes, o que era resíduo se transformará em energia, ajudando assim na preservação da natureza e na economia de energia (PAULA, 2006).

Segundo Barcellos e Pimenta (2001), quando pequenas partículas de material sólido são prensadas para formar blocos de forma definida e tamanho maior, o processo é chamado de briquetagem. Através deste processo, os finos de materiais diversos, subprodutos do beneficemente industrial, são convertidos em produtos de maior valor comercial. Este processo permite aumentar o teor energético dos resíduos, de forma que os briquetes podem ter uma densidade calorífica por unidade de volume até quatro vezes superior à do material do qual foi feito e ser de 20-30% mais densos que a madeira em estado natural. Além disso, os briquetes queimam por mais tempo e mantêm uma temperatura mais constante. O maior



conteúdo calorífico dos briquetes pode ser explicado pelo fato de que o processo de briquetagem aumenta o teor de carbono fixo.

A lenha ecológica, como é conhecido o briquete produzido com pó de serragem e com restos de madeira descartados por indústrias, pode ser uma boa alternativa de produção de energia além de um meio adequado de se lidar com os resíduos vegetais (Figura 4). Além de carvão e resíduos de madeira, outros resíduos lignocelulósicos podem ser utilizados na produção de briquetes, como por exemplo, a casca de arroz, palha de milho, sabugo, bagaço de cana, etc., e obter briquetes com qualidade superior a qualquer lenha (PAULA, 2006). A utilização de determinada matéria prima para a fabricação de briquetes, vai variar e ter sua escolha, de acordo com a finalidade do produto final para sua utilização. A finalidade para qual o briquete será utilizado, é que determinará seu formato, densidade, granulometria, entre outras características que irão interferir na sua composição final.

Figura 4 - Briquetes Produzidos com Resíduos Madeireiros.



Fonte: Foelkel, 2016.

Segundo Paula (2010), os briquetes podem substituir a lenha em sua totalidade e dar um destino viável econômica e ambientalmente aos resíduos. Além de possuírem formato regular e constituição homogênea, o que resulta em queima uniforme do material, ser de fácil

manuseio e transporte, de baixa umidade, e por possuir maior densidade, tem seu poder calorífico aumentado. De acordo com o Centro Nacional de Referência em Biomassa - CENBIO (2009), nas capitais e grandes cidades, o briquete tem papel destacado, competindo diretamente com a lenha e o carvão vegetal. Atualmente, os fabricantes não conseguem atender à demanda de briquetes na cidade de São Paulo, onde existem 5.000 pizzarias e 8.000 padarias, das quais 70% utilizam fornos à lenha.

De acordo com Foelkel (2016), levando-se em conta a escala de produção e a baixa densidade energética de alguns tipos de biomassa florestal, são necessários enormes volumes de material para estocar, manusear, transportar e alimentar os equipamentos queimadores. Isso tem levado a que muitos considerem a possibilidade de densificação da biomassa, ou seja, a produção de péletes ou briquetes de madeira densificada. Esses materiais possuem baixo teor de umidade (máximo 15%) e alta densidade em base de peso seco por volume sólido de cada peça (cerca de 1.000 kg/m<sup>3</sup>).

Assim, sendo a geração de resíduos um problema constante nas indústrias madeireiras, onde estoques de resíduos com grande ocupação de área são criados, a briquetagem proporciona a redução do volume desse material estacionado no pátio da serraria por meio da densificação dos resíduos sendo uma forma rentável de reutilização dos resíduos como fonte de energia (BORGHI, 2012).

### **2.3.2 Parâmetros da briquetagem**

Briquete consiste de um composto de resíduos, no caso deste trabalho, lignocelulósico, de composição química pré-determinada antes da fabricação. É importante o conhecimento da composição química deste material para melhor consorciar (misturar) os diferentes tipos de resíduos que poderão servir como matéria prima de fabricação, principalmente o teor de lignina, pois interfere diretamente na colagem e no poder de queima e geração de energia deste material.

O briquete é fabricado em uma máquina denominada de briquetadeira que pode ser encontrada nos mais diversos modelos no mercado, onde é realizada a compactação da biomassa, sob alta temperatura e pressão durante o período de tempo mais adequado ao material (resíduo) que está sendo utilizado.

De acordo com Paula (2010), o processo de briquetagem descrito anteriormente se refere à produção a partir de resíduos lignocelulósicos, em que o ligante é a lignina. Em processos que utilizam, na produção de briquetes, somente o carvão, por exemplo, é

necessária a utilização de um aglomerante artificial, pois, neste caso, a lignina já foi degradada, não é mais plástica e não faz o papel de aglomerante.

A briquetagem é afetada por muitos fatores, entre os quais podem ser citados: temperatura; pressão do processo; tamanho da partícula; umidade do material, etc.. (BARCELLOS; PIMENTA, 2001). A densificação da biomassa consiste na compactação a elevadas pressões, o que provoca a elevação da temperatura do processo para mais de 100°C. O aumento da temperatura colabora para a plastificação da lignina, o que conduz à adesão das partículas sem a utilização de produtos aglomerantes. Para que a aglomeração seja bem sucedida, é necessária uma quantidade mínima de água nas partículas, algo entre 8% a 15% de umidade. Também é fundamental que o tamanho das partículas seja adequado à tecnologia que está sendo empregada (FOELKEL, 2016).

A granulometria não só influencia na aglomeração das partículas, com ou sem aglutinantes, mas também nas propriedades físico-mecânicas dos briquetes (BORGHI, 2012). Segundo Silva (2007, apud RODRIGUES, 2010), as máquinas de compactação podem processar materiais *in natura*, mas dentro de determinadas faixas de granulometria. Para a maioria dos equipamentos, o comprimento máximo das partículas não deve ser superior a 25% do diâmetro do produto compactado. O processo de compactação das partículas pequenas acontece mais facilmente, pois ocorre uma maior ligação entre elas devido a maior área de superfície de contato que provoca um aumento da densidade do material compactado.

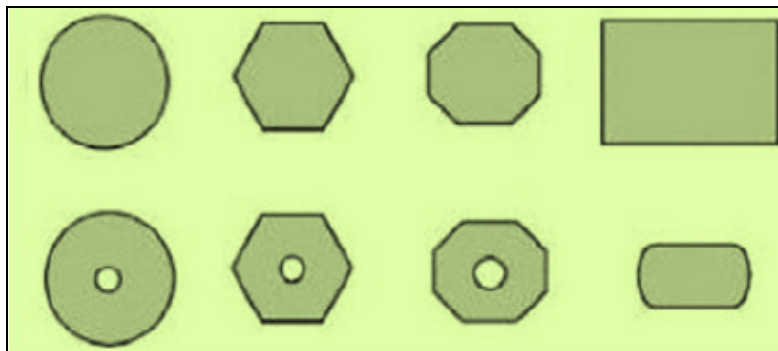
A determinação precisa da umidade beneficia uma correta utilização do produto final (briquete) e durante o processo de secagem da madeira é imprescindível para a obtenção de produtos com qualidade e com menores perdas de matéria prima, com grande vantagem econômica (BORGHI, 2012). Barroso et al. (2009) concluíram que reduzindo a umidade da madeira, ocorre um aumento da eficiência do processo de briquetagem, pois a energia aplicada para evaporar água e diminuir a umidade do resíduo seria menor, sendo maior aproveitada para plastificar a lignina.

De acordo com Rowell (1987 apud GENTIL 2008, p. 9),

O briquete de madeira é uma peça sólida de serragem ou maravalha comprimida com uma carga média de 6 tf a 8 tf, tensão de 90 kg/cm<sup>2</sup> a 145 kg/cm<sup>2</sup>, gerando uma temperatura de 170°C a 270°C na câmara de briquetagem para a decomposição parcial da lignina (efeito termoplástico), teor de umidade base úmida de 5% a 15% sendo o ótimo 8%, com ou sem aglutinante, com uma densidade entre 1,0 t/m<sup>3</sup> a 1,5 t/m<sup>3</sup>, apresentado em peças cilíndricas ou hexagonais de cerca de 70 mm a 100 mm de diâmetro e comprimento de 10 cm a 40 cm.

De acordo com o modelo do maquinário (briquetadeira), pode-se obter briquetes de diversos formatos, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Diferentes Formatos de Briquetes Produzidos em Briquetadeiras.



Fonte: Sanchez, 2012.

Alguns formatos são mais produzidos comercialmente, no caso, os briquetes de formatos cilíndricos. Outro tipo que é bastante fabricado é o de formato octogonal, com um oco circular na parte central, ou de forma retangular, ligeiramente arredondado nos quatro canto ao longo de todo briquete, o que proporciona uma maior resistência durante o manejo e eventuais quedas dos briquetes. Este tipo de briquete facilita o armazenamento por ocuparem menos espaços e possuírem uma maior igualdade de peso, quando comparados aos briquetes de forma cilíndrica e o octogonal com parte oca ao centro (SANCHEZ, 2012).

O processo de briquetagem ainda requer muita investigação, principalmente nos tratamentos prévios dos materiais e ao melhoramento do processo. A investigação deve estar orientada ao desenvolvimento de tecnologia que possa ser aplicada em forma comercial.

### 2.3.3 Propriedades dos briquetes

Na fabricação de briquete, as matérias primas utilizadas podem ser: serragem, maravalha, casca de arroz, palha de milho, sabugo, bagaço de cana-de-açúcar, casca de algodão, café entre outros, obtendo-se briquetes com qualidade superior (QUIRINO, 1991).

Segundo Gentil (2008, p.30),

O diâmetro do briquete quando de madeira para queima em caldeiras, fornos e lareiras é de 70 a 100mm e com comprimento de 250 a 400mm. Outras dimensões com diâmetros de 28 a 65mm são usadas em estufa, fogão de alimentação

automática, grelha e churrasqueira. A biomassa adensada a pressões de 100MPa ou mais é denominada briquete quando tiver um diâmetro maior que 30mm.

Embora variáveis, os briquetes feitos no Brasil tem uma densidade aparente de 1,0 t/m<sup>3</sup> a 1,4 t/m<sup>3</sup>, um poder calorífico superior (PCS) de 4300 a 4800kcal/kg, uma umidade entre 8 a 10%, densidade a granel de 600 a 700kg/m<sup>3</sup>, teores de voláteis de 81%, cinzas de 1,2% e carbono fixo de 18,8%. No Brasil, a serragem tem uma densidade a granel entre 100 kg/m<sup>3</sup> a 300 kg/m<sup>3</sup>, umidade de 15% a 55% base úmida (GENTIL, 2008).

Propriedades químicas da biomassa empregada na fabricação dos briquetes devem ser avaliadas. Segundo Foelkel (2016), os constituintes da biomassa que mais afetam seu poder calorífico são por ordem de importância: teor de lignina, teor de carbono e teor de extrativos graxos. De acordo com Rodrigues (2010), a análise da composição elementar quantifica os elementos químicos, em porcentagem, presentes nos materiais combustíveis responsáveis pelo fornecimento de energia. Dentre estes, o carbono e o hidrogênio são os principais elementos. O enxofre também libera energia durante a queima, embora seja um inconveniente devido à corrosão das caldeiras e a formação de gases poluentes.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Departamento de Ciências Florestais (DEF) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

#### 3.1. MATERIAIS

Os resíduos de biomassa florestal utilizados nesse estudo foram obtidos de duas empresas de papel e celulose, uma que trabalha com madeiras de *Eucalyptus spp.* e outra com madeira de *Pinus taeda*. Os resíduos foram separados em 4 classes de acordo com suas espécies, local de coleta e composição, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos resíduos florestais conforme local de coleta nas empresas, espécies e composição da biomassa.

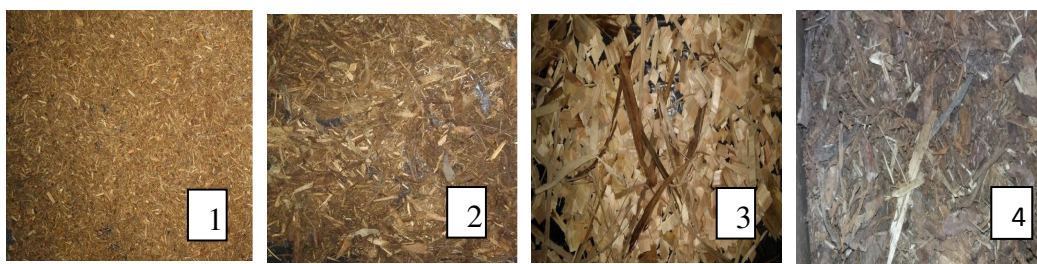
Classe	Gênero / Espécie	Local de coleta	Composição
1	<i>Eucalyptus spp.</i>	Pátio de madeira	serragem + palitos de madeira
2		Floresta	cascas + folhas
3		Área industrial	cavacos + lascas de madeira
4	<i>Pinus taeda</i>	Pátio de madeira	Cascas

Fonte: O Autor

A Figura 6 mostra os tipos de resíduos florestais separados como Classes 1, 2, 3 e 4 utilizados nesse estudo.

Após classificados, os resíduos foram deixados secar ao ar livre até atingir umidade de equilíbrio de aproximadamente 12%. Devido à desuniformidade do tamanho dos resíduos provenientes das empresas, foi necessário triturá-los em moinho Willey para adequar a sua granulometria.

Figura 6 - Amostras dos resíduos florestais identificados como classes 1, 2, 3 e 4, conforme as espécies, local de coleta nas empresas e composição da biomassa



Fonte: O Autor

Parte dos resíduos florestais triturados no moinho foi classificada para as análises químicas. Nesse caso, utilizou-se as partículas que passaram pela peneira 40 mesh, ficando retidas em peneira de 60 mesh, conforme a norma TAPPI T204 cm-97 (1997). O restante dos resíduos foi classificado em peneira de 10 mesh a fim de obter amostras com partículas homogêneas para fabricação dos briquetes. Optou-se por esta granulometria para que os resíduos tivessem maior compactação durante a fabricação dos briquetes.

## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1. Caracterização dos resíduos florestais

#### 3.2.1.1 Teor de umidade

A umidade das partículas foi determinada pela diferença de uma massa conhecida de resíduo antes e após a secagem à 105°C até peso constante em estufa de secagem, com controle de temperatura, conforme metodologia descrita na norma TAPPI T210 cm-93.

O teor de umidade foi determinado a partir da equação:

$$\text{T.U. (\%)} = [(P1 - P2)/P1] \times 100$$

Onde:

T.U. = percentagem de umidade

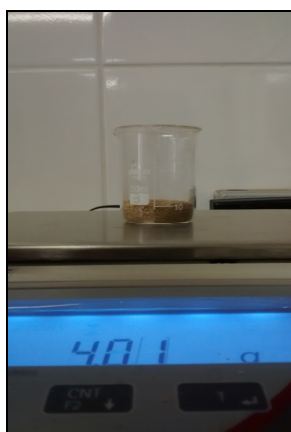
P1 = Peso da amostra seca ao ar (peso inicial da amostra)

P2 = Peso da amostra seca em estufa

### 3.2.1.2 Densidade à granel

Para a determinação da densidade à granel do material (resíduos florestais) a ser utilizado para a fabricação dos briquetes, utilizou um recipiente de capacidade conhecida, neste caso um becker de 50 mL, onde foi colocada a amostra até a marca dos 10 mL (Figura 7). Após obter-se o peso da amostra, calculou-se a densidade à granel pelo peso obtido no volume conhecido, ou seja,  $10\text{mL} = 10\text{cm}^3$ .

Figura 7 - Pesagem do material para calculo de densidade à granel.



Fonte: O Autor.

### 3.2.1.3 Propriedades químicas

Para a caracterização química das diferentes classes dos resíduos, foram realizadas as seguintes análises: teores de extrativos totais, de lignina insolúvel em ácido, de compostos inorgânicos (cinzas) e de holocelulose. Os procedimentos analíticos empregados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Procedimentos analíticos para caracterização química das diferentes classes de resíduos florestais.

Parâmetro	Procedimento
Extrativos totais	TAPPI T 264 cm-97 (adaptada)
Lignina insolúvel em ácido	TAPPI T 222 om-98 (adaptada)
Compostos inorgânicos	TAPPI T 211 om-93

Fonte: O Autor



O teor de holocelulose foi determinado por diferença conforme a expressão (ROSA, 2003):

Equação 1 - Teor de holocelulose

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{teor de lignina insolúvel} + \text{teor de extrativos totais})$$

#### 3.2.1.4 Análise química imediata

Os procedimentos para a análise química imediata das diferentes classes de resíduos florestais seguiram as normas ABNT NBR 8112 (1986), para determinação do teor de umidade, matérias voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca. Foram utilizadas amostras de resíduos trituradas e classificadas em peneiras de 40/60 mesh. Primeiramente, foi realizada a determinação do teor de umidade da amostra em estufa de secagem à  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , por um período de 2 horas.

Para a determinação do teor de matérias voláteis foi colocado 1 grama (a.s) da amostra em cadinho de porcelana os quais foram colocados na porta da mufla aquecida à  $900 \pm 10^{\circ}\text{C}$  por 3 minutos. Posteriormente, as amostras foram colocadas no interior da mufla e incineradas por 7 minutos com a porta fechada. O percentual de cinzas foi obtido também em mufla, porém à  $700^{\circ}\text{C}$  de temperatura (Figura 8).

Figura 8 - Análise de materiais voláteis.



Fonte: O Autor.

O teor de carbono fixo, por ser uma medida indireta, foi calculado de acordo com a seguinte equação:

Equação 2 - Teor do carbono fixo

$$CF = 100 - (MV + CZ)$$

Em que:

CF = Teor de Carbono Fixo em %

CZ = Teor de Cinzas em %

MV = Teor de Materiais Voláteis em %

### 3.2.1.5 *Análise Termogravimétrica (TGA)*

A análise termogravimétrica é uma técnica que permite o registro constante da perda de massa de uma amostra submetida a uma variação de temperatura. Com base nessa técnica é possível interpretar como é o comportamento da amostra durante a sua decomposição térmica, além de fornecer informações sobre quais faixas de temperatura a decomposição é mais pronunciada (SANTOS, 2010 apud RODRIGUES 2010).

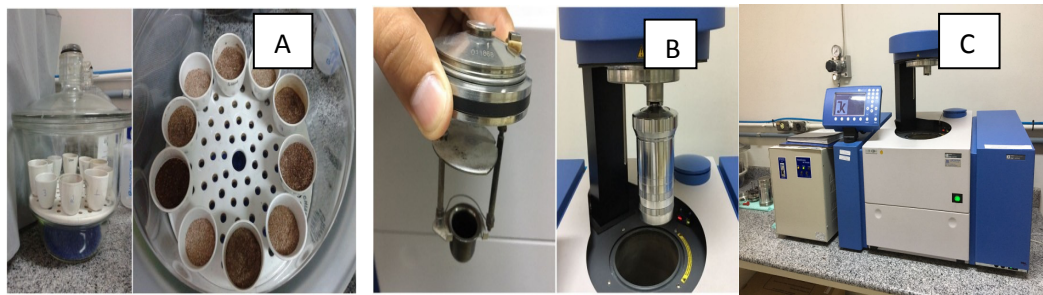
Essa análise foi realizada com a utilização do equipamento NETZSCH TG 209F1, pertencente ao laboratório de Física da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas, RS. As amostras foram analisadas em uma faixa de temperatura de 0 a 800 °C, com taxa de aquecimento de 10°C min<sup>-1</sup> sob atmosfera de nitrogênio (10 mL/min). Para a realização desta análise foram utilizadas amostras classificadas em peneiras de 60 mesh.

### 3.2.1.6 *Poder calorífico*

Segundo Peres (2006 apud RODRIGUES. 2010, p.14) o poder calorífico determina a quantidade de energia que está disponível no combustível por unidade de massa que é liberada na câmara de combustão através de uma reação química. O poder calorífico (PC) é dividido em poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico superior (PCS), sendo que a diferença entre os dois consiste na quantidade de energia requerida para evaporar a água contida nos gases de exaustão.

Para análise de poder calorífico superior (PCS), as amostras de resíduos florestais moídas e classificadas em peneiras de 60 mesh foram colocadas em estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por 48 horas (até atingirem peso constante) para retirada total da umidade. Em seguida, pesou-se 0,5g de amostra completamente seca em um cadinho metálico e posteriormente o cadinho foi colocado em bomba adiabática modelo IKA C5000 (Figura 9). Essa análise foi realizada nos laboratórios da Embrapa Florestas em Colombo no Paraná.

Figura 9 - Determinação do poder calorífico dos resíduos florestais: Amostras (A); Cadinho metálico onde as amostras foram colocadas para a realização da análise (B); Bomba adiabática IKA C5000 (C).



Fonte: O Autor

### 3.2.2 Confeção dos briquetes

Os briquetes foram produzidos em briquetadeira de laboratório, marca LIPPEL, modelo LB 32 (Figura 10).

Figura 10 - Briquetadeira laboratorial modelo LB 32.



Fonte: O Autor.

As condições de briquetagem foram determinadas experimentalmente através de testes preliminares de aplicação de pressão, temperatura e determinação do tempo para prensagem e resfriamento, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Testes de condições preliminares de fabricação com variação de pressão, temperatura, tempos de prensagem e de resfriamento para confecção dos briquetes.

Teste	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Tempo de Prensagem (min.)	Resfriamento (min.)	Análise visual
1	1500	120 +/- 5	5	5	SR
2	100	120 +/- 5	3	6	SR
3	50	120 +/- 5	5	3	CR
4	50	130 +/-5	9	7	CR
5	50	200 +/- 5	6	9	CR

Em que: SR = sem a presença de rachaduras; CR = Com a presença de rachaduras.

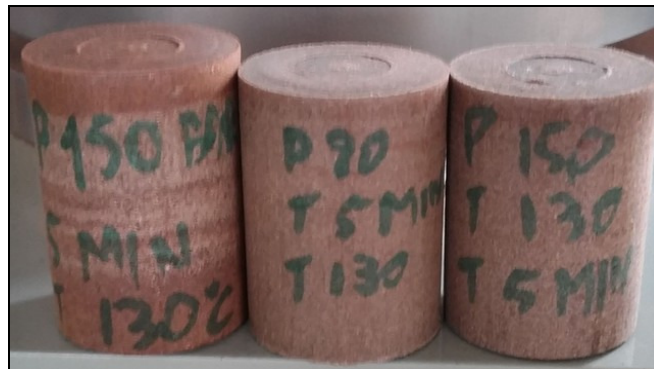
Fonte: O Autor

Segundo Rodrigues (2010), a pressão escolhida para a briquetagem está relacionada a melhor compactação e a ausência ou menor número de rachaduras no briquetes, o que pode ocorrer devido a saída de gases na medida que a pressão é aliviada. O autor também afirma

que a escolha das temperaturas é determinada em função do ponto de transição vítrea da lignina que se inicia a 70°C.

As condições escolhidas para a confecção dos briquetes nesse estudo foram as do teste 2, nas quais se obtiveram briquetes com o menor tempo de prensagem, sem rachaduras, fissuras e deformações (Figura 11).

Figura 11 - Briquetes em condições desejáveis.



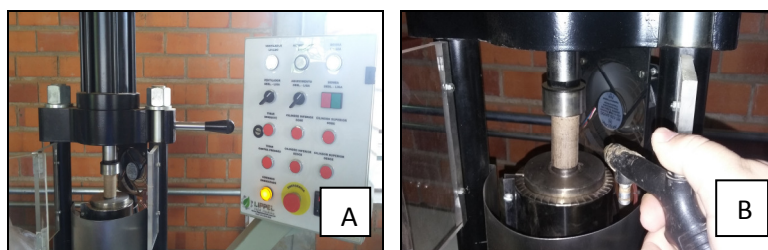
Fonte: O Autor

Para a fabricação dos briquetes utilizou-se uma metodologia padrão adaptada as indicações existentes no manual da briquetadeira LIPPEL LB-32. Após a máquina ser ligada, alcançar e estabilizar a pressão e temperatura desejadas, adotou-se o seguinte procedimento:

- Colocou-se em um recipiente aproximadamente 74,5g de amostra, ou seja, a quantidade de material suficiente para preencher a cápsula de compactação da máquina. Com o auxílio de um funil, o material foi depositado dentro da cápsula de compactação, tomando-se o cuidado da retirada de ar utilizando-se um bastão de vidro.
- Após o completo preenchimento da cápsula de compactação com o material, fechou-se a parte superior da briquetadeira e deu-se início ao processo de briquetagem seguindo as condições apresentadas no Teste 2 da Tabela 3.

Conforme a Figura 12, assim que o briquete saiu da cápsula de compactação (A) iniciou-se o processo de resfriamento, o qual foi realizado utilizando uma pistola a ar (B), além do ventilador acoplado, próprio da máquina briquetadeira, pelo período estabelecido.

Figura 12 - Processo de fabricação dos briquetes: (A) Capsula de compactação; (B) Pistola de ar.



Fonte: O Autor.

Para a confecção dos briquetes, foram escolhidos 10 tratamentos em função do tipo de classe de resíduos florestais (Tabela 1), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Tratamentos empregados para a confecção dos briquetes em função das classes de resíduos florestais.

Tratamento	Classes de resíduos (CR)	Proporção das classes
1	1	100%
2	2	100%
3	3	100%
4	4	100%
5	1 e 2	50% CR1 : 50% CR2
6	1 e 3	50% CR1 : 50% CR3
7	1 e 4	50% CR1 : 50% CR4
8	2 e 3	50% CR2 : 50% CR3
9	2 e 4	50% CR2 : 50% CR4
10	3 e 4	50% CR3 : 50% CR4

Fonte: O Autor

Para cada tratamento foram realizadas 10 repetições, sendo que todas as proporções das classes de resíduos florestais foram pesadas e misturadas uniformemente conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Preparação das proporções das amostras das classes de resíduos florestais para confecção dos briquetes.



Fonte: O autor.

### 3.2.2.1 Análises visuais da qualidade dos briquetes

As observações visuais foram realizadas após o tempo de resfriamento durante as medições de altura e diâmetro dos briquetes. Foi observada a presença de rachaduras ou fissuras e deformações nas laterais dos briquetes (Figura 14).

Figura 14 - Análise visual dos briquetes.

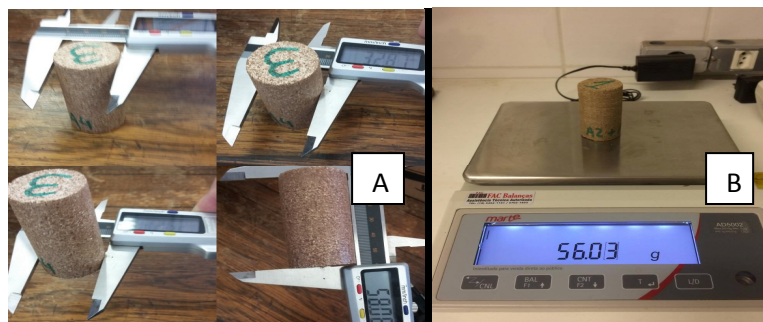


Fonte: O Autor

### 3.2.2.2 Determinação das densidades aparente e energética dos briquetes

A densidade aparente (DA, g/cm<sup>3</sup>) dos briquetes foi determinada pelo método estereométrico, ou seja, pela relação da massa/volume em um dado teor de umidade. Para a determinação do volume de cada briquete produzido, foram feitas medições do diâmetro em três pontos (base, meio e topo) do briquete utilizando-se um paquímetro digital com precisão de 10<sup>-3</sup> mm. A massa do briquete foi determinada por meio de uma balança analítica com precisão de 10<sup>-2</sup> g (Figura 15), conforme metodologia descrita por Souza (2014). Calculou-se a densidade aparente por tratamento, a partir da média dos 10 briquetes confeccionados.

Figura 15 - Medições de diâmetro (A) e massa (B) dos briquetes.



Fonte: O Autor

A densidade energética (DE) do briquetes foi obtida através do produto do poder calorífico útil (PCU) e da densidade aparente (DA), conforme a equação a seguir:

Equação 3 - Densidade Energética do Briquete

$$DE = (PCU \cdot DA) / 1000 = (\text{Mcal/m}^3)$$

Em que:

PCU = Poder Calorífico Útil ( Kcal/g)

DA = Densidade Aparente (g/cm<sup>3</sup>)



Para a obtenção do poder calorífico útil (PCU), primeiro determinou-se os valores do poder calorífico inferior (PCI), utilizando as seguintes equações:

Equação 4 - Poder Calorífico Inferior

$$PCI = PCS (1 - T_{U.b.u.}) - (600 \cdot T_{U.b.u.}) = (\text{Kcal/m}^3)$$

Equação 5 - Poder Calorífico Útil

$$PCU = PCI [(100 - T_{U.b.u.})/100] - 6H = (\text{Kcal/m}^3)$$

Em que:

PCS = Poder Calorífico Superior;

T<sub>U.b.u.</sub> = Teor de Umidade Base Úmida da Amostra;

H = Teor de Hidrogênio (% em base seca);

Utilizou-se 6% de hidrogênio para todos as classes de resíduo.

### 3.2.2.3 Resistência à compressão

Segundo Melo (2000 apud GONÇALVES 2010), a resistência dos briquetes à compressão foi determinada em sentido perpendicular, para se prever o seu comportamento mecânico submetido a uma determinada carga ou esforço, considerando a sua posição de armazenamento. No ensaio, o briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo frature. A resistência à compressão é um parâmetro significativo na avaliação do briquete ao manuseio e condições de trabalho.

Após a etapa de resfriamento, durante o processo de fabricação, os briquetes foram pesados e mensurados com relação ao seu comprimento e diâmetro. Posteriormente, os briquetes foram acondicionados em câmara climatizada a 20°C e 65% de umidade relativa, até atingirem peso constante para posterior realização do teste mecânico. O ensaio mecânico foi realizado na máquina universal de ensaio modelo EMIC, na qual os briquetes foram comprimidos no sentido perpendicular a uma velocidade de 0,3 mm min<sup>-1</sup> até a ruptura (Figura 16). Utilizou-se a metodologia adaptada da norma ABNT NBR ISO 11093-9, uma vez que não existe norma específica para briquetes (GOUVÊA, 2012).

Figura 16 - Ensaio mecânico para a determinação da resistência a compressão dos briquetes.



Fonte: O Autor.

### 3.2.3 Análise estatística

Para análise estatística, os dados foram tabelados no programa Excel 2013®, e avaliados estatisticamente pelo uso do software Statgraphics Centurion XV.II. As médias das análises químicas foram comparadas pelo teste LSD de Fisher em 5% de probabilidade de erro.

Foram avaliados estatisticamente, cinco características de maior importância para a fabricação dos briquetes, sendo: teor de umidade, teor de lignina, densidade aparente, poder calorífico e resistência a compressão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS FLORESTAIS

#### 4.1.1 Teor de Umidade

De acordo com Foelkel (2016), quanto maior o teor de umidade, maior será a perda de energia da biomassa. É por essa razão a prática de se deixar esse material secando no campo, tanto para redução de seu peso a transportar, como para aumentar o seu valor de Poder Calorífico Útil.

A umidade dos resíduos florestais das classes 1 a 4 variou de 8,9 a 12,72%, conforme apresentado na Tabela 5. Recomenda-se, para a fabricação de briquetes, que o teor de umidade do material, esteja entre 8 e 15% de umidade, sendo assim, os valores obtidos para os resíduos estudados estão de acordo com o recomendado na literatura (ALVES JÚNIOR; SANTOS, 2002 apud PAULA, 2010).

Tabela 5 - Teor de umidades das classes de resíduos florestais.

Classe	Teor de Umidade (%)
1	10,64
2	8,93
3	10,29
4	12,72

Fonte: O Autor

#### 4.1.2 Densidade a granel

A Tabela 6 apresenta os valores médios da densidade a granel dos resíduos florestais e suas misturas (tratamentos) empregados para a fabricação dos briquetes.

Tabela 6 - Valores médios da densidade a granel dos tratamentos com os resíduos e suas misturas empregados para a fabricação de briquetes.

Tratamento	Densidade a granel (Kg/m <sup>3</sup> )
1	372
2	389
3	375
4	364
5	341
6	328
7	365
8	380
9	365
10	377

Fonte: O Autor

Como podemos observar na Tabela 6, os valores encontrados para a densidade a granel entre os tratamentos foram baixos e muito próximos. Apesar disso, os tratamentos com os resíduos florestais do gênero *Eucalyptus* resultaram nos maiores valores, o que já esperado por se tratar de espécies florestais com madeira de maior densidade quando comparada a espécies do gênero *Pinus*.

De acordo com Silva et al. (2007), a densidade a granel é uma propriedade relacionada com a granulometria do material, ou seja, maior ou menor quantidade de massa por unidade de volume. Para Foelkel (2016), a densidade a granel é um parâmetro crítico no emprego da biomassa para energia. Segundo o autor, quanto mais alta essa propriedade, melhor, pois o desejado é desenvolver produtos menos volumosos e mais compactados ou densos.

Segundo Gentil (2008), como o comércio do briquete é feito por preço por tonelada e o frete pago por metro cúbico, quanto maior for a densidade a granel menor será o valor do frete. Desta forma, a característica de concentração energética, assim como a densidade a granel são fatores que favorecem a demanda de briquete.

### 4.1.3 Propriedades químicas

As características químicas dos resíduos florestais devem ser considerados quando se estuda a qualidade da biomassa para fins energéticos. Na Tabela 7 são apresentados os valores médios da composições química dos resíduos florestais nas diferentes classes.

Tabela 7 - Valores médios da composição química das classes de resíduos florestais

Classe	TE (%)	TL (%)	TC (%)	TH(%)
1	2,5	17,13	1,92	80,73
2	2,2	13,26	0,44	84,49
3	4,86	15,69	3,74	79,45
4	18,08	41,68	2,74	60,24

Em que: TE = Teor de Extrativos Totais ; TL= Teor de Lignina ; TC= Teor de minerais ou Cinzas ; TH=Teor de Holocelulose.

Fonte: O Autor

De acordo com a Tabela 7, as classes de resíduos florestais estudadas apresentaram composição química distinta. Os maiores valores de extrativos, lignina e cinzas foram encontrados para a classe de resíduos 3, o que já era esperado por ser tratar de um material composto apenas por casca da espécie *Pinus taeda*. Segundo Colodette (2001), de maneira geral, pode se dizer que a casca apresenta diferenças químicas em comparação com a madeira, entre elas: maiores teores de extrativos e cinzas e menores de celulose e hemicelulose, o que está de acordo com os valores encontrados nesse estudo.

De acordo com Foelkel (2016), a casca possui altíssimo porcentual de cinzas quando comparado a madeira, o que pode ser verificado nesse estudo, pois o teor mais elevado de minerais foi obtido na classe de resíduos 3.

Quanto a fração de polissacarídeos ou holocelulose, podemos observar que a classe de resíduos 2 apresentou alta porcentagem, o que poderia ser explicado pela presença das folhas no material. Segundo Gentil (2008), os compostos orgânicos (extrativos), inorgânicos (cinzas) e lignocelulósicos (lignina e holocelulose) são encontrados nas folhas em proporções distintas àquelas encontradas na madeira.

#### 4.1.4 Análise química imediata

A Tabela 8 apresenta os valores médios de análise química imediata das diferentes classes de resíduos florestais.

Tabela 8 - Valores médios de análise química imediata

Classe	MV (%)	TC (%)	CF (%)
1	90,18	1,92	7,89
2	94,61	0,44	4,94
3	86,72	3,74	9,53
4	88,12	2,74	9,12

Em que: MV= Materiais Voláteis (%); TC= Teor de Cinzas (%); CF= Carbono Fixo(%).

Fonte: O Autor

Segundo Foelkel (2016), o teor de carbono fixo da biomassa costuma variar entre 14% a 16,5%, o que corresponde a teores de materiais voláteis entre 83.5 a 86%. Quanto mais alto o teor de carbono fixo mais energética será a biomassa, embora os materiais voláteis também gerem energia em processos de combustão. Os teores de cinzas em resíduos florestais podem variar entre 2 a 6% de seu peso seco.

Os valores encontrados para materiais voláteis, cinzas e carbono fixo nesse estudo (Tabela 8) estão de acordo com a literatura (GOUVÊA, 2012). Como podemos observar na Tabela 8, a classe de resíduo 3 resultou nos menores valores de materiais voláteis e de cinzas, consequentemente no maior teor de carbono fixo, o que já era esperado por se tratar do resíduo com maior porcentagem de lignina (Tabela 7). Segundo Gouvêa (2012), quanto maior for o teor de lignina nas amostras, menor será a quantidade de materiais voláteis produzidos, pois como a lignina tem anel aromático, possui consequentemente maior quantidade de carbono fixo.

Além disso, o tipo de lignina, assim como a relação siringila/guaiacila influencia na geração de energia de uma biomassa. De acordo com Castro (2011), a lignina guaiacila, presente em madeiras de coníferas, possui o C5 disponível para reação com outros anéis de fenilpropano, tem maior massa molecular e, consequentemente, é mais favorável à produção de carvão vegetal, devido à sua maior estabilidade térmica. Dessa maneira, a classe de

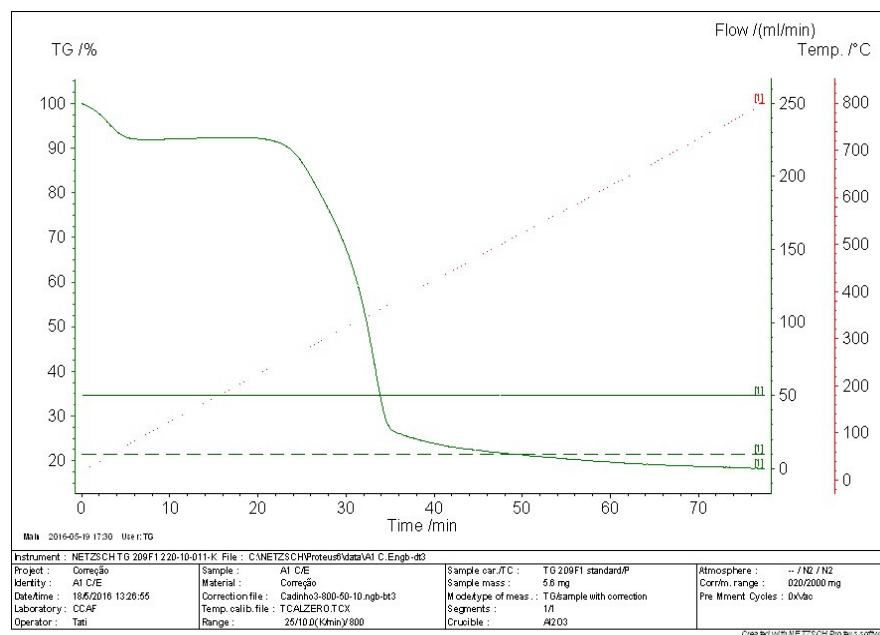
resíduos 4 (composta por casca de pinus) tornar-se-ia mais atrativa como fonte de matéria prima na geração de energia.

#### 4.1.5 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica fornece informações globais sobre o conjunto de reações que ocorrem durante a pirólise e permite comparar o comportamento térmico da biomassa (RODRIGUES, 2010). O perfil termogravimétrico contribui para desenvolver as condições ótimas de operação e o melhor entendimento do processo de conversão térmica de uma determinada amostra (FOLGUERAS et al., 2003 apud RODRIGUES, 2010).

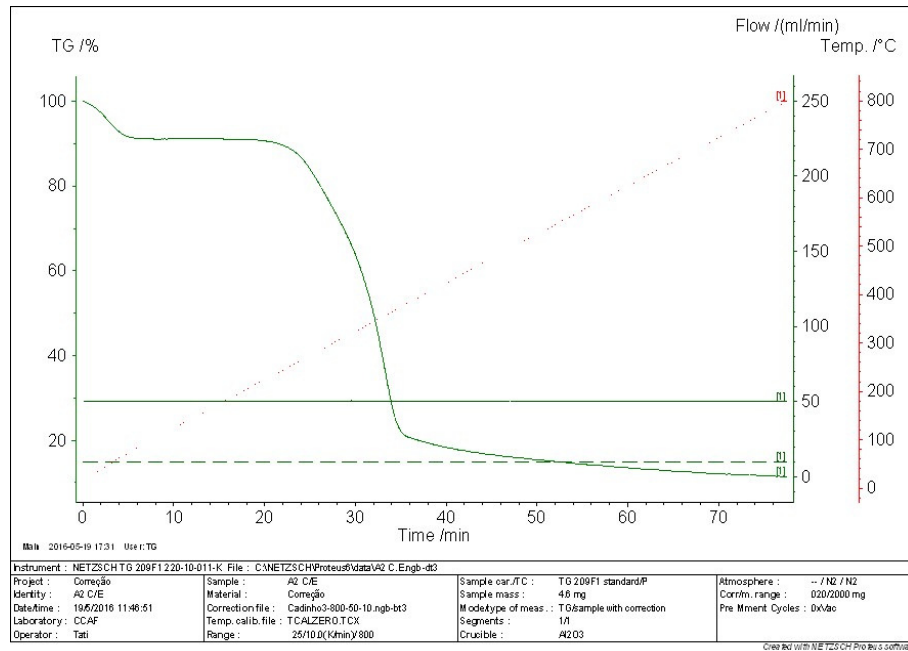
As curvas obtidas das análises termogravimétricas (TGA), para as quatro classes de resíduos, estão apresentadas nas Figuras 17 a 20.

Figura 17 - Curva termogravimétrica da classe de resíduo florestal composto por serragem e palitos de madeira de *Eucalyptus spp.*.



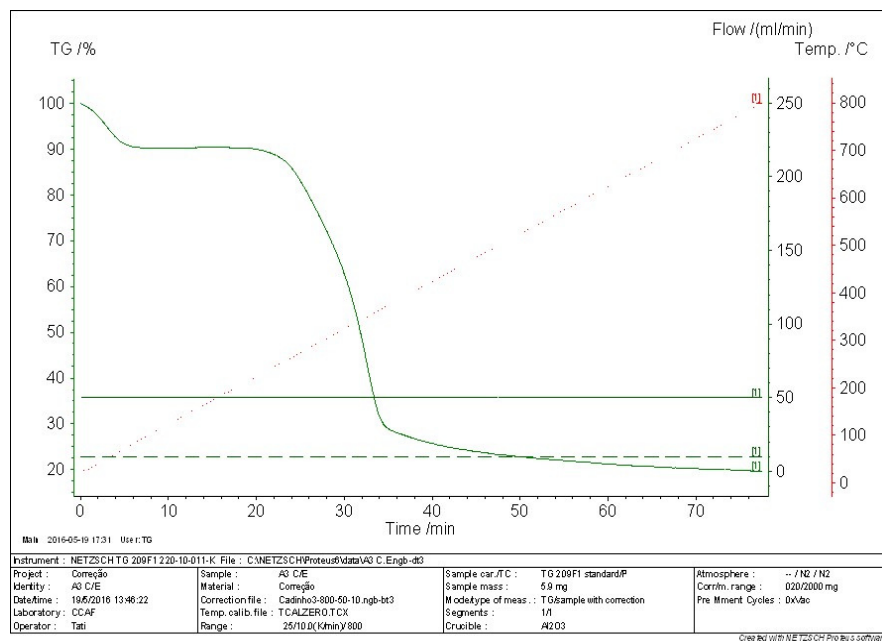
Fonte: O Autor

Figura 18 - Curva termogravimétrica da classe de resíduo florestal composto por cascas e folhas de *Eucalyptus spp* .



Fonte: O Autor

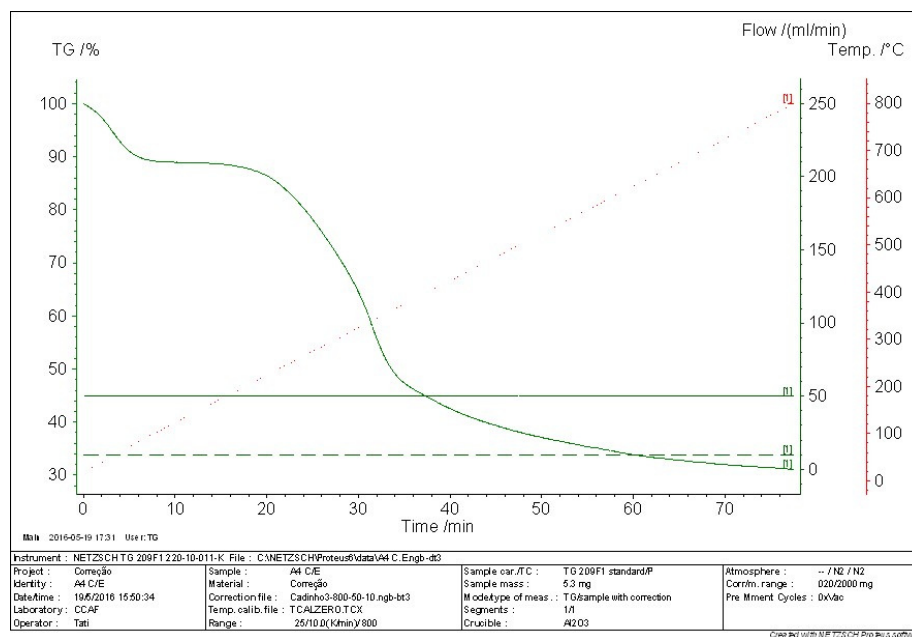
Figura 19 - Curva termogravimétrica da classe de resíduo florestal composto por cavacos e lascas de madeira de *Eucalyptus spp.*.



Fonte: O Autor



Figura 20 - Curva termogravimétrica da classe de resíduo florestal composto por casca de *Pinus taeda*.



Fonte: O Autor

De maneira geral, a perda de massa foi baixa com o tratamento térmico. Observa-se que os perfis de degradação térmica das diferentes classes de resíduos 1, 2 e 3 foram similares, ocorrendo apenas pequena diferença na curva de degradação da classe 4. As perdas de massa começaram a partir dos 24°C de temperatura e foram constantes até o final da análise com 77 minutos (777°C). A maior degradação dos resíduos florestais ocorreu entre o intervalo de tempo de 26-36 minutos da análise.

Segundo Vital, Carneiro e Pereira (2013), a decomposição térmica dos componentes primários da madeira ocorre de forma diferenciada e depende da faixa de temperatura em consideração. Yang et al. (2007) citado por Ramalho et al. (2015), realizaram a pirólise dos componentes químicos da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina), e concluiu que na faixa de temperatura 300°C a 400 °C ocorre a maior degradação da celulose, composto o qual é o mais abundante na madeira. Os referidos picos podem ser atribuídos também à degradação das hemiceluloses, com perda de peso, sobretudo na faixa de 220°C a 315°C. Já a lignina,

apresenta decomposição térmica mais difícil e com baixa perda de massa, uma vez que sua decomposição ocorre desde o início da carbonização até aproximadamente 900 °C.

Na análise termogravimétrica correspondente a classe de resíduo 4 (Figura 20) podemos observar uma menor perda de massa, o que significa que esse material é mais resistente a degradação térmica que os demais resíduos estudados. Essa afirmativa pode ser explicada devido maior percentual de lignina encontrado nessa classe de resíduo (Tabela 7). O resíduo da classe 4 na temperatura de 794°C e 77 minutos de análise resultou em 31.17530% de cinzas.

#### 4.1.6 Poder calorífico

Os constituintes da biomassa que mais afetam seu poder calorífico são por ordem de importância: teor de lignina, teor de carbono e teor de extrativos graxos. O importante no caso dos extrativos é que são constituintes que ocupam espaços externos às paredes celulares (lúmens e vacúolos), logo eles somam peso seco às biomassas das paredes celulares. A lignina é o principal constituinte responsável pelo aumento do poder calorífico, pois ela possui entre 60 a 64% de carbono elementar em sua composição molecular, enquanto a celulose e as hemiceluloses possuem bem menos (42 a 46%) (FOELKEL, 2016).

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios de poder calorífico superior (PCS) obtidos dos tratamentos empregados na fabricação dos briquetes, em função das classes de resíduos e suas misturas.

Tabela 9 - Valores médios de poder calorífico superior (PCS) dos tratamentos em função dos resíduos florestais empregados para a confecção dos briquetes

Tratamento	PCS (Kcal/Kg)
1	4406,78
2	4181,71
3	4363,95
4	4631,94
5	4167,14
6	4298,43

7	4385,93
8	4161,17
9	4143,66
10	4497,07

Fonte: O Autor

Conforme os dados apresentados na Tabela 9, pode-se observar que os tratamentos 4 e 10 resultaram nos maiores valores de PCS, o que já era esperado por se tratar de tratamentos compostos pelo resíduo da classe 4, o qual apresentou o menor percentual de holocelulose e os maiores de lignina e extrativos totais (Tabela 7). De acordo com Sederoff e Chang(1991), citado por Vital, Carneiro e Pereira (2013), a lignina apresenta um conteúdo de carbono cerca de 50% maior do que o encontrado nos polissacarídeos. Portanto apresenta um potencial realmente grande para produção de energia. Além disso, os extrativos voláteis são importantes na queima direta da madeira, pois se degradam mais rapidamente e ajudam a manter a chama de combustão.

Quirino et al.(2005) e Jara (1989), concluíram que o poder calorífico superior da madeira, além da umidade, é influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc). Desta maneira, as coníferas que apresentam um conteúdo de resinas e lignina maior que as latifoliadas ostentam conseqüentemente um maior poder calorífico superior, que varia também conforme a parte da árvore que esteja em combustão (casca, nós, ramos, madeira do toco). Essa afirmativa pode ser corroborada nos resultados de PCS encontrados para os resíduos utilizados nesse estudo.

Também, é possível verificar na Tabela 9, que os tratamentos 3 e 6 resultaram em excelentes valores de PCS, pois as classes de resíduos florestais que compõe esses tratamentos são formados de cavacos e lascas de madeiras. Segundo Foelkel (2016), esse tipo de material tem excelente valor energético, bastando que se melhore a sua granulometria usando algum triturador específico para redução de dimensões e homogeneização.

#### 4.2 DENSIDADES APARENTE E ENERGÉTICA DOS BRIQUETES

A Tabela 10 apresenta os valores médios das densidades aparente, energética e estabilizada dos briquetes produzidos pelos diferentes tratamentos em função da classe de resíduos florestais.

Tabela 10 - Valores médios das densidades aparentes, energética e estabilizada dos briquetes produzidos pelos diferentes tratamentos.

Tratamento	Densidade aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade energética (Mcal/m <sup>3</sup> )	Densidade estabilizada (ton/m <sup>3</sup> )
1	1073,11	3921,3	1,0699
2	1147,12	4021,2	1,1413
3	1075,04	3899,2	1,0649
4	1226,87	4644,7	1,2160
5	1157,67	4010,9	1,1263
6	1110,02	3953,8	1,0899
7	1183,07	4260,4	1,1528
8	1131,93	3921,9	1,1363
9	1201,17	4096,7	1,1864
10	1176,06	4359,1	1,1531

Fonte: O Autor.

As densidades aparentes dos briquetes obtidas nesse estudo apresentaram resultados satisfatórios uma vez que o Banco de Dados de Biomassa do Brasil estipula uma densidade aparente de briquetes de 1000 Kg/m<sup>3</sup> a 1300 Kg/m<sup>3</sup>.

Os briquetes produzidos com classe de resíduos 4 (casca de *Pinus taeda*), apresentaram os melhores resultados para densidade energética (tratamentos 4, 7, 9 e 10), o que pode ser atribuído ao maior teor de lignina e conseqüentemente ao alto teor de carbono fixo nesse resíduo.

Conforme a Tabela 10, as densidades aparentes dos briquetes foram influenciadas pelo tipo de resíduo utilizado para sua fabricação. Podemos observar que os briquetes mais densos foram obtidos com resíduos florestais dos tratamentos que utilizaram os resíduos da Classe 4, possivelmente pela melhor compactação promovida por esse material, o que acarretou redução do volume do briquete para uma mesma massa e o que já era esperado devido aos maiores valores de densidade a granel obtidas com esse resíduo e suas misturas (Tabela 6).

A Tabela 10 mostra também os valores de densidade aparente dos briquetes obtidos após o período de 15 dias (densidade estabilizada) em câmara climatizada com monitoramento constante até a estabilização das dimensões dos briquetes. Considerando as medidas dos briquetes para densidade aparente sem o período de estabilização em câmara climatizada, os briquetes avaliados após esta climatização, apresentaram diferença de apenas 0,017kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BRIQUETES

Conhecer a resistência mecânica dos briquetes é de grande importância econômica e comercial para se manter um produto de alta qualidade durante o período de estocagem e armazenamento. A Tabela 11 apresenta os resultados do ensaio mecânico realizados nos briquetes produzidos pelos diferentes tratamentos.

Tabela 11 - Valores médios dos ensaios mecânicos dos briquetes.

Tratamentos	Carga de Ruptura (Kgf)
1	524
2	654
3	439
4	419
5	573
6	586
7	472
8	610
9	582

10	392
----	-----

Fonte: O Autor.

Como podemos observar na Tabela 11, os briquetes produzidos pelos tratamentos 2 e 8 resultaram nos maiores valores de resistência. O aumento da resistência a ruptura dos briquetes está associado ao maior teor de lignina (devido a transição vítrea desse composto químico a elevadas temperaturas) e granulometria do material empregado, pois influenciará no grau de compactação durante a fabricação dos briquetes. Segundo Gouvêa (2012), a adição de lignina na composição química da matéria prima utilizada na fabricação de briquetes visa o aumento da resistência mecânica e do poder calorífico.

#### 4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os Quadros da ANOVA (1 a 5), distribuem a variância dos dados em dois componentes: um componente entre grupos e outro intragrupos, ou seja, relaciona os grupo entre eles e também relaciona a variância dos dados dentro de cada grupo. O método empregado para descrever o teste de médias é o procedimento de diferença mínima significativa (LSD) de Fisher.

##### 4.4.1 Teor de Umidade

Quadro 1 - ANOVA para dados de teor de umidade dos resíduos florestais.

CLASSE	GL	SQ	QM	F	P
Intergrupos	3	22,153	7,38432	83,97	0,0000
Intragrupos	8	0,703533	0,0879417		
Total (corrig.)	11	22,8565			

Fonte: O Autor.

Neste caso, a coeficiente F apresenta valore de 83,9684 (83,97), sendo o cociente estimado entre e dentro dos grupos. Como o valor de P com relação a F é menor que 0,05,

isso significa que existe uma diferença estatisticamente significativa entre as medidas das quatro variáveis, com nível de 95% de confiança.

#### 4.4.2 Teor de lignina

Quadro 2 - ANOVA para os dados do teor de lignina dos resíduos florestais.

CLASSE	GL	SQ	QM	F	P
Intergrupos	3	1582,21	527,405	381,16	0,0000
Intragrupos	8	11,0696	1,38369		
Total	11	1593,28			

Fonte: O Autor

O coeficiente F, neste caso, apresentou valor igual a 381,157 (381,16), sendo o coeficiente estimado entre os grupos e dentro dos grupos de amostras avaliados. Como o valor de P avaliado em F foi menor que 0,05, significa que existe uma diferença estatisticamente significativa entre as médias das quatro variáveis com um nível de 95% de confiança.

#### 4.4.3. Poder Calorífico

Quadro 3 - ANOVA para os dados de poder calorífico superior dos resíduos florestais.

CLASSE	GL	SQ	QM	F	P
Intergrupos	9	724807	80534,1	32,11	0,0000
Intragrupos	20	50163,4	2508,17		
Total	29	774970			

Fonte: O Autor.

Sendo o valor de F, neste caso igual a 32,1087 (32,11), este valor, é o coeficiente entre o estimado entre grupos e o estimado dentro de cada grupo. Sendo o valor de P em resposta a F menor que 0,05, observa-se que existe uma diferença estatística significativa entre as médias das 10 variáveis selecionadas, com nível de 95% de confiança.

#### 4.4.4. Densidade Aparente

Quadro 4 - ANOVA para os dados de densidade aparente dos resíduos florestais.

CLASSE	GL	SQ	QM	F	P
Intergrupos	9	0,0713655	0,0079295	9,75	0,0000
Intragrupos	20	0,0162704	0,000813518		
Total	29	0,0876358			

Fonte: O Autor

O valor de F, neste caso igual a 9,74718 (9,75), este valor, é o coeficiente entre o estimado entre grupos e o estimado dentro de cada grupo. Sendo o valor de P em resposta a F menor que 0,05, observa-se que existe uma diferença estatística significativa entre as médias das 10 variáveis selecionadas, com nível de 95% de confiança.

#### 4.4.5. Resistência a Compressão

Quadro 5 - ANOVA para os dados de resistência a compressão dos resíduos florestais.

CLASSE	GL	SQ	QM	F	P
Intergrupos	9	179304,0	19922,7	3,61	0,0000
Intragrupos	19	104918,0	5522,0		
Total	28	284222,0			

Fonte: O Autor

Sendo o valor de F, neste caso igual a 3,60788 (3,61), este valor, é o coeficiente entre o estimado entre grupos e o estimado dentro de cada grupo. Sendo o valor de P em resposta a



F menor que 0,05, observa-se que existe uma diferença estatística significativa entre as médias das 10 variáveis selecionadas, com nível de 95% de confiança.

#### 4.4.6. Testes de Média

Tabela 12 - Teor de Umidade

Tratamento	TU
AM1	10,64 B
AM2	8,92 A
AM3	10,29 B
AM4	12,72 C

Fonte: O Autor.

Tratamentos a AM1 e AM3 são iguais, os demais são todos diferentes.

Tabela 13 - Teor de Lignina

Tratamento	Lignina
AM1	17,13 B
AM2	13,26 A
AM3	15,68 B
AM4	41,68 C

Fonte: O Autor.

Tratamentos a AM1 e AM3 são iguais, os demais são todos diferentes.

Tabela 14 - Poder Calorífico

Tratamento	Resistência à compressão
AM1	4406,79 C
AM2	4181,71 A
AM3	4363,95 BC
AM4	4631,94 E
TRAT 5	4167,14 A
TRAT 6	4298,43 B
TRAT 7	4385,93 C
TRAT 8	4161,17 A
TRAT 9	4143,66 A
TRAT 10	4497,07 D

Fonte: O Autor.

Os melhores foram os tratamentos AM2, TRAT 5, TRAT8 e TRAT9 e o pior foi o AM4.

Tabela 15 - Densidade Aparente

Tratamento	Densidade aparente (unidade)
AM1	1,07 A
AM2	1,15 BCD
AM3	1,08 A
AM4	1,23 F
TRAT 5	1,16 BCDE
TRAT 6	1,11 AB
TRAT 7	1,18 DEF
TRAT 8	1,14 BC
TRAT 9	1,20 EF
TRAT 10	1,77 CDE

Fonte: O Autor.

Os tratamentos que possuem a mesma letra não diferem entre si. Os tratamentos AM1 e AM3 são os melhores (ou piores) e o tratamento AM4 é o pior (ou melhor). O TRAT 6 não difere do melhor, entretanto não difere do segundo melhor, ou seja, ele pode ou não ser considerado como na melhor classe de tratamentos. O TRAT 5 pode ser enquadrado desde a segunda melhor classe até a segunda pior, pq não difere dos tratamentos da classe “B” e nem da classe “E”.

Tabela 16 - Resistência à Compressão

Tratamento	Ensaio Mecânico
AM1	524,0 BCD
AM2	654,0 A
AM3	439,3 DE
AM4	548,0 ABCD
TRAT 5	573,3 ABC
TRAT 6	586,0 ABC
TRAT 7	472,0 CDE
TRAT 8	610,0 AB
TRAT 9	581,7 ABC
TRAT 10	392,0 E

Fonte: O Autor.

O melhor tratamento foi o AM2 e o pior foi o TRAT 10. Entretanto os tratamentos AM2, AM4, TRAT 5, TRAT 6, TRAT 8 e TRAT 9 não diferiram da melhor classe e os AM3 e TRAT 7 não diferiram da pior classe.

## 5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos nas diversas análises e avaliações, pode-se concluir que:

- Os tratamentos com os resíduos florestais do gênero *Eucalyptus* resultaram nos maiores valores de densidade a granel;
- A classe de resíduos 4 resultou no maior valor de lignina e teor de carbono fixo;
- Os tratamentos 4 e 10 resultaram nos maiores valores de PCS;
- Os briquetes produzidos com classe de resíduos 4 (casca de *Pinus taeda*), apresentaram os melhores resultados para densidade energética (tratamentos 4, 7, 9 e 10);
- Os tratamentos 2 e 8 produziram briquetes de maior resistência a compressão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Carvão Vegetal: Análise Imediata**. NBR-8112 (MB1857), Outubro 1986.

BARCELLOS, D. C.; PIMENTA, A.S. **Energia da Madeira: Briquetagem de Carvão Vegetal**. Apostila de aula prática. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2001.

BARROSO, R. A.; VALE, A. T., XAVIER, L. F. Consumo de biomassa energética e produção de resíduos de madeira no Distrito Federal. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**. Garça, ano 8, n. 13, 2009. Disponível em: <<http://www.revista.inf.br/florestal13/pages/artigos/AnoVIII-N13-art02.pdf>>. Acesso em: 11 Nov. 2016.

BENEDETTI, O. I. S. et al. **Análise preliminar da produção de etanol a partir de celulose: caminhos e desafios para a produção de álcool no Rio Grande Do Sul**. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 272-284, mai/ago 2009.

BERNI, M. D. **Fracionamento da biomassa lignocelulósica com a finalidade de produzir produtos novos**. O Papel. nº 8. p. 38., 2016.

BORGHI, M. M. **Efeito da granulometria na avaliação dos briquetes**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2012.

BOUNDELLE, G. M.; CHIES, D.; MARTINS, D. G. **O processo de fabricação de painéis compensados no Estado do Paraná analisado por meio dos rendimentos e dos resíduos gerados**. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2., 2002, Curitiba. Anais. Curitiba: UFPR, 2002. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>> . Acesso em: 12 nov. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 1996**. Brasília: MME, 1996. 150p.

CASTRO, A. F. N. M.. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus sp.* na madeira e carvão vegetal**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011.

CELULOSE ONLINE. **Biomassa florestal no brasil é responsável por geração de riqueza e milhares de empregos**, 2016. Disponível em: <<http://celuloseonline.com.br/biomassa-florestal-no-brasil-e-responsavel-por-geracao-de-riqueza-e-milhares-de-empregos>>. Acesso em: 18 de out. 2016.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA – CENBIO. **Aproveitamento energético de resíduos de madeira e florestais na forma de briquetes**. Disponível em: <[http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br\\_briquete.asp](http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_briquete.asp)> Acesso em: 12 de nov. 2016.

COLODETTE, J. L.. **Química da madeira** – Curso de Pós-graduação Strictu Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel, Viçosa - MG, 2001.

DEVES, R.; FRANCIO, N. **A importância do aproveitamento dos resíduos de madeira como alternativa de energia renovável da Empresa briquetes Alto da Glória.** 2007. Disponível em: < <http://sinop.unemat.br/projetos/ciclodopalestrasemcsa/historico/1/02.pdf> >. Acesso em: 15 de nov. 2016.

FELFLI, F. F, LUENGO, C. A; ROCHA, J. D. **Briquetes torreficados:** viabilidade técnico-econômica e perspectivas no mercado brasileiro. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 5, 2004, Campinas.

FOELKEL, C. E. B. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade Parte 1:** Biomassa Florestal & Florestas Energéticas. In: Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2016.

FOELKEL, C. E. B. **As Biorrefinarias Integradas no Setor Brasileiro de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto.** In: Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2012.

GENTIL, L. B. V. **Tecnologia e economia do briquete de madeira.** 2008. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília- DF, 2008.

GONÇALVES, J. E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*.** 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu – SP. 2010.

GOUVÊA, A. F. G. **Produção de briquete a partir da adição da lignina kraft com resíduo da indústria moveleira.** 2012. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.

HALL, D.O.; HOUSE, J.I.; SCRASE, I. **Visão geral de energia e biomassa.** In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. (Org.). Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira. Campinas: UNICAMP, 2005. p.25-67.

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

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

MÜLLER, D.S. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba - MG.** 2005. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

MUNDIM, A.O.F. **Sistemas Rurais integrados: alimentos e energia.** In: SEMINÁRIO "PLANTANDO O FUTURO: REFLORESTAMENTO PRODUTIVO, CONSORCIADO E INCLUDENTE", 2006, Belo Horizonte. Resumos. Disponível em: < <http://www.fbds.org.br/Apresentacoes/ApresentacaoSebrae.pdf> >. Acesso em: 10 novembro 2016.

PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. Dissertação de mestrado (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2010.

PAULA, J. C. M. **Aproveitamento de resíduos de madeira para confecção de briquetes**. 2006. Dissertação mestrado (Mestrado em Engenharia Florestal). Instituto de Florestas. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2006.

PEREIRA, W. D.; NETO, J. L. **Uso de biomassa na geração de energia elétrica na indústria de celulose**. II Congresso Brasileiro de Resíduos Orgânicos, 2011. 12p.

PUNTES, R. S. E. S. **Expansão das florestas plantadas com fins energéticos no Brasil e sua influência nas emissões dos gases de efeito estufa - GEE: análise de dois cenários futuros**. 2010. Dissertação de mestrado (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2010.

QUIRINO, W. F. et al. **Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos**. Revista da Madeira, n.89, p.100-106, 2005.

QUIRINO, W. F. **Características de briquetes de carvão vegetal a seu comportamento na combustão**. 1991. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, 1991.

RAMALHO, F. M. G. et al. **Análise Termogravimétrica de Madeira de Plantios Consorciados e Puros Visando Produção de Carvão Vegetal**. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/282219708\\_ANALISE\\_TERMOGRAVIMETRIC\\_A\\_DE\\_MADEIRA\\_DE\\_PLANTIOS\\_CONSORCIADOS\\_E\\_PUROS\\_VISANDO\\_PRODUC\\_AO\\_DE\\_CARVAO\\_VEGETAL\\_THERMOGRAVIMETRIC\\_ANALISYS\\_IN\\_WOOD\\_OF\\_MIXED\\_AND\\_PURE\\_PLANTATIONS\\_FOR\\_CHARCOAL\\_PRODUCTION](https://www.researchgate.net/publication/282219708_ANALISE_TERMOGRAVIMETRIC_A_DE_MADEIRA_DE_PLANTIOS_CONSORCIADOS_E_PUROS_VISANDO_PRODUC_AO_DE_CARVAO_VEGETAL_THERMOGRAVIMETRIC_ANALISYS_IN_WOOD_OF_MIXED_AND_PURE_PLANTATIONS_FOR_CHARCOAL_PRODUCTION)> Acesso em 18 de out. de 2016.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ROSA, C. A. B.. **Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose Kraft**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria – RS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. 149p. 2003.

SAAD, S.A. et al., **Chemically modified sugarcane bagasse as a potentially low-cost biosorbent for dye removal**. Desalination, v. 264, n. 1-2, p. 123-128, dez. 2010.

SANCHEZ, J. P. P.. **Los Bosques como Sistemas de Bioalmacenamiento y Bioenergía**. In 11° Congreso Nacional del Medio Ambiente - Chile. Disponível em: <<http://www.conama2012.conama.org>> Acesso em: 10 de nov. 2016

SANTOS, F.; COLODETTE, J. L.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia & Biorefinaria**. Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais. Viçosa, MG: 2013. 551p.

SILVA, M.G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M.M.; NAGAISHI, T.Y.R.; GALVÃO, G.R. **Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA.** Acta Amazonica, Manaus, v.37, n.1, p.61-70, 2007.

SOARES FILHO, S.; OVEREND, R.; MACEDO, I.; COUTO, L.; FREITAS, M. **Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos 20 anos.** Disponível em: <[www.agr.unicamp.br/energia/Ener20/pdf/relatorios\\_mesas/paper\\_mesa5.pdf](http://www.agr.unicamp.br/energia/Ener20/pdf/relatorios_mesas/paper_mesa5.pdf)> Acesso em: 10 nov. 2016.

SOARES, T. S.; CARNEIRO, A. C. O.; GONÇALVES, E. O.; LELLES, J. G. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista científica eletrônica de engenharia florestal.** Ano IV, número, 08, agosto de 2006.

VIGUIRISTI, J.A. **Biocombustibles de segunda generación.** Física y Sociedad, n.19, p.31-33, 2008.

VILAS BOAS, Mariana Almeida. **Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira para fins energéticos.** In: Santos, F.; Colodette, J.; Queiroz, J. H. (Org.). Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais. 1ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2013, v. 1, p. 321-354.

ZIECH, Raiana Quirino de Souza. **Características tecnológicas da madeira de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem.) produzida no sul do estado de Minas Gerais.** 2008. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2008.