



**EFEITO DA UMIDADE E DA ACÚSTICA NA TORREFAÇÃO DE MADEIRAS
DE *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa***

**MYLA MEDEIROS FORTES
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**EFEITO DA UMIDADE E DA ACÚSTICA NA
TORREFAÇÃO DE MADEIRAS DE *Eucalyptus grandis*,
Pinus elliottii e *Dinizia excelsa***

MYLA MEDEIROS FORTES

ORIENTADOR: PROF. AILTON TEXEIRA DO VALE

CO-ORIENTADOR: PROF. EDER PEREIRA MIGUEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PPGEFL.DM-306/2018

BRASÍLIA/DF: FEV – 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“EFEITOS DA UMIDADE E DA ACÚSTICA NA TORREFAÇÃO DE
MADEIRAS DE *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliotii* e *Dinizia excelsa*”

MYLA MEDEIROS FORTES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Orientador)



Prof. Dr. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Examinador Interno)



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO SETTE JUNIOR (Universidade Federal de Goiás – UFG);
(Examinador Externo)



Prof. Dr. JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB).
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 16 de fevereiro de 2018.

FORTES, MYLA MEDEIROS.

EFEITO DA UMIDADE E DA ACÚSTICA NA TORREFAÇÃO DE MADEIRAS DE *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa*.

(EFL/FT/UNB, Mestre, Dissertação de Mestrado-Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Torrefação

2. Acústica

3. Densidade

4. Umidade

I. EFL/FT/UNB

II. Título (série)

FICHA CATALOGRÁFICA

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FORTES, M.M. (2018). Efeito da umidade e da acústica na torrefação de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação PPGEFL.DM-306/2018. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Myla Medeiros Fortes.

TÍTULO: Efeito da umidade e da acústica na torrefação de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa*.

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Myla Medeiros Fortes

Avenida Dom Abel Ribeiro, Quadra 25, Lote 2. Setor Central.

74980-010 Aparecida de Goiânia – GO – Brasil.

medeirosmyla@gmail.com

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo cuidado, proteção, amor e tudo mais, porque sem Ele eu não sou nada.

À minha família, meus pais José Alves e Marta Medeiros, meus irmãos Murylo Medeiros e Maryane Medeiros por estarem sempre dando força para concretização deste sonho.

À meu orientador, Prof. Dr Ailton Texeira do Vale, pelo apoio, apredizado, amizade, ensino, correção e incentivo para concetização desta etapa.

Ao meu coorientador Dr. Eder Pereira pelos ensinamentos, sugestões e apoio para realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Produtos Florestais (SFB) e aos Analistas Ambientais Bruno Sant'Anna, Luiz Gustavo Galvão, ao técnico do Setor de Energia Antonio Greg, a estagiaria Thais de Azevedo Nazareno e ao técnico do Setor de Engenharia e Física da Madeira João por viabilizarem e apoiarem a realização deste trabalho.

Ao Dr.Marcus Vinicius Girão pelos ensinamentos e sugestões e ao Doutorando Edgar Amaral Silveira pela caracterização do reator para uso acústico e auxilio.

À Universidade de Brasília, e programa de Pós-Graduação do departamento de Engenharia florestal, pela oportunidade e todo conhecimento direcionado para meu desenvolvimento acadêmico. Agradeço também a Mariana Neves estagiaria do laboratório de Tecnologia da madeira da Engenharia florestal.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

Às minhas amigas, Júlia Santiago Lira e Luiza Rodrigues pelo auxilio, amizade, confiança e moradia.

Agradeço também aos amigos e colegas de pós graduação, Mirella Basileu, Roberta Santos Souza, Marco Bruno Valadão, Luiz Gustavo Galvão, Marcella Hermida de Paula, Ilvan Junior, Jonas, Joabel, Maiara Neri, Juliana de Oliveira Campos e Victoria Matos que, direta e indiretamente, fizeram esse sonho se concretizar e estiveram presentes durante esta etapa.

A todos, o meu muito obrigado! Vocês fazem parte dessa história.

RESUMO

Efeito da umidade e da acústica na torrefação de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa*.

Autor: Myla Medeiros Fortes

Orientador: Prof. Dr. Ailton Teixeira do vale

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, 16 fevereiro de 2017.

A biomassa é fonte de energia com grande potencial para suprir a crescente demanda para substituição de fontes energéticas prejudiciais ao meio ambiente, devido sua abundância, renovabilidade e redução de emissão de gases do efeito estufa; Contudo, por se apresentar heterogênea, higroscópica, ter baixo teor de carbono fixo e baixa densidade há dificuldade para seu uso eficiente, requerendo tratamentos como a torrefação. A torrefação é um método de tratamento térmico a temperaturas relativamente baixas, até 300°C, que visa produzir um combustível com maior densidade energética. Outra técnica de forma conjunta à torrefação, o uso da acústica, acoplado ao reator de torrefação, pode aumentar as taxas de transferência de calor convectiva, observados em processos termo-acústicos. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da acústica e da umidade no processo de torrefação com base nas características físicas e energéticas da madeira torreficadas. Buscou-se avaliar os efeitos nas principais propriedades energéticas (densidade energética, poder calorífico e análise química imediata) e outras propriedades que têm relação com o uso energético (densidade aparente, tensão máxima na compressão paralela, rendimento gravimétrico, carbono, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio). As madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa* a 0 e 12% de umidade foram submetidas a processo de torrefação com taxa de aquecimento de 5°C por mim, temperatura final de 250°C e tempo na temperatura final de 60 minutos, na presença e ausência de onda sonora de 2478 Hz. Os resultados indicaram que o uso acústico melhorou a densidade energética e diminuiu a resistência do material torreficado de *E. grandis*. No *Pinus elliottii* não teve influências e na *Dinizia excelsa* diminuiu a densidade energética do material torreficado. A presença de umidade no *Eucalyptus grandis* e de *Pinus elliottii* aumentou o carbono fixo, diminuiu o material volátil e diminuiu a resistência do material torreficado e apenas no *Pinus elliottii* aumentou o teor de cinzas. Na *Dinizia excelsa* diminuiu a resistência, diminuiu o carbono fixo e aumentou o material volátil. Os gráficos de perda de massa mostram claramente uma menor quantidade de energia para corpos de prova torreficados com umidade inicial de 12%. A acústica é uma boa condutora de calor.

Palavras chaves: Acústica, *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii*, *Dinizia excelsa*, propriedades energéticas.

ABSTRACT

**Effect of moisture and acoustics on woods torrefaction of *Eucalyptus grandis*,
Pinus elliottii e *Dinizia excelsa*.**

Author: Myla Medeiros Fortes

Advisor: Prof. Dr. Ailton Teixeira do vale

Forest Science Post-Graduation Program.

Brasília, 16 February de 2017.

Biomass is a source of great potential to supply the growing demand for the substitution of energy sources harmful to the environment, due your abundance, renewability and reduction of greenhouse gas emissions; However, because it presents heterogeneous, hygroscopic, have low fixed carbon content and low density there is difficulty for its efficient use, requiring treatments such as torrefaction. Torrefaction is a method of thermic treatment at relatively low temperatures, up to 300 ° C, which aims to produce a fuel with higher energy density. Another technique in conjunction with torrefaction, the use of acoustics, which coupled to the torrefaction reactor, can increase convective heat transfer rates observed in thermo-acoustic processes. This study has as goal to evaluate the effect of acoustics and moisture on the torrefaction process based on the physical and energetic characteristics of the wood.. We sought to evaluate the effects on the main energy properties (Energy density, calorific value and immediate chemical analysis) and other properties related to energy use (apparent density, maximum stress in parallel compression, gravimetric yield, carbon, oxygen, hydrogen). The wood of *E. grandis*, *Pinus elliotti* and *Dinizia excelsa* Dulke at 0 and 12% of moisture were submitted to a torrefaction process with a heating rate of 5 ° C per minutes, final temperature of 250 ° C and time at the final temperature of 60 minutes, in the presence and non-attendance of soundwave of 2478 Hz. The results indicated that the acoustic use improved the energy density and decreased the resistance of *E.grandis* torrefied material. In *Pinus elliotti* it had no influence and in *Dinizia excelsa* it diminished the energy density of the torrefied material. The attendance of moisture in the species of *E.grandis* and *Pinus elliotti* increased the fixed carbon, decreased the volatile material and decreased the resistance of the torrefied material and only in the *Pinus elliotti* it increased to ashes. In *Dinizia excelsa* it decreased the resistance, decreased the fixed carbon and increased the volatile material. The mass loss graphs clearly show a lower amount of energy for turbulent specimens with initial moisture of 12%. Acoustics are a good conductor of heat.

Key words: acoustics, *E.grandis*, *Pinus Elliotti*, *Dinizia excelsa*, energy properties.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESE.....	2
3. OBJETIVOS	2
3.1. Objetivo principal	2
3.2. Objetivos secundários	2
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4.1. Espécies de Madeira	2
4.1.1 <i>Eucalyptus grandis</i>	2
4.1.2. <i>Dinizia excelsa</i>	4
4.1.3. <i>Pinus elliottii</i>	4
4.2. Biomassa e energia	5
4.3. Características da Madeira	6
4.4. Torrefação	8
4.5. Acústica	9
5. MATERIAL E METODOS	11
5.1. Material utilizado	11
5.2. Produção do material torreficado	12
5.3. Análise estatística	14
5.4. Caracterização da madeira	15
5.5. Caracterização do material torreficado	21
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
6.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS DE <i>Eucalyptus grandis</i>, <i>Pinus elliottii</i> E <i>Dinizia excelsa</i>	22
6.1.1. <i>Eucalyptus grandis</i>	22
6.1.2. <i>Pinus elliottii</i>	23
6.1.3. <i>Dinizia excelsa</i>	24
6.1.4. Características elementares e energéticas das madeiras torreficadas de <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Pinus elliotti</i> e <i>Dinizia excelsa</i>	25
6.2. EFEITO DA ACÚSTICA E DA UMIDADE NA TORREFAÇÃO DE <i>Eucalyptus grandis</i>	27
6.3. EFEITO DA ACÚSTICA DA UMIDADE NA TORREFAÇÃO DE <i>Pinus elliottii</i>	33
6.4. EFEITO DA ACÚSTICA E DA UMIDADE NA TORREFAÇÃO DE <i>Dinizia excelsa</i> ..	37
7. CONCLUSÃO	42

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
---	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Visualização de uma onda senoidal	10
Figura 2. Amostras de 3x3x3cm orientadas das madeiras de (A) <i>Pinus elliottii</i> , (B) <i>Eucalyptus grandis</i> e (C) <i>Dinizia excelsa</i> Ducke.....	12
Figura 3. Gráfico gerado por software LabView. A) Perda de massa em tempo real; B) Patamar e rampas determinados para estes ensaios; C) Temperatura superficial da amostra; D) Temperatura interna da amostra; E) Temperatura de controle do reator.	13
Figura 4. Esquema de um reator de torrefação. Fonte: Edgar Amaral Silveira, Doutorado em Ciências Mecânicas – Unb.	14
Figura 5. Equipamentos utilizados na produção da madeira torrificada com acústica: A) Reator de torrefação em funcionamento, B) Gerador de sinais na frequência utilizada, C) Amostras torrificadas sobre suporte da balança e suspensa através de termopares.	14
Figura 6. Determinação da massa (A) e das dimensões (B) das amostras de madeira para o cálculo da densidade aparente nas madeiras “in natura” e torrificadas.	15
Figura 7. Amostras torrificadas (A) e Máquina EMIC– DL 30.000 (B) para a determinação da compressão paralela às fibras.....	16
Figura 8. Preparo das amostras para caracterização química e poder calorífico. A) Moinho de facas do tipo Willey. B) Agitador eletro-magnético de peneiras.	17
Figura 9. Sequência para obtenção de dados para a determinação do teor de materiais voláteis. A) Amostras moídas, classificadas e secas a 0% de umidade. B) Pesagem de um grama do material. C) Amostras na tampa da mufla. D) Amostras no interior da mufla. E) Amostras no dessecador.	18
Figura 10. Sequência para obtenção de dados para a determinação do teor de cinzas. A) Amostras inseridas na Mufla. B) Após ensaio amostras em dessecador. C) Cinzas de biomassa de <i>Pinus elliottii</i>	19
Figura 11. Sequência de obtenção de dados para a determinação do poder calorífico. A) Material moído pelletizado. B) Introdução da amostra e do fio de lã para realização do ensaio C) Bomba calorimétrica.	20
Figura 12. Analisador elementar CHNS Perkin Elmer modelo EA 2400.	21
Figura 13. Perfil de degradação térmica de <i>E. grandis</i> com umidade de 0 (A) e 12% (B) com presença e ausência de acústica.	32
Figura 14. Perfil de degradação térmica de <i>Pinus elliottii</i> com umidade de 0 (A) e 12% (B) com presença e ausência de acústica.	37
Figura 15. Perfil de degradação térmica de <i>Dinizia excelsa</i> com umidade de 0 (A) e 12% (B) na presença e ausência de acústica.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios das características químicas, elementares, energéticas e mecânicas de <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Pinus elliottii</i> e <i>Dinizia excelsa</i>	22
Tabela 2. Médias dos atributos elementares e energéticos dos tratamentos oriundos da torrefação de <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Pinus elliottii</i> e <i>Dinizia excelsa</i>	25
Tabela 3. Valores de “F” para análise imediata de material torreficado de <i>Eucalyptus grandis</i>	27
Tabela 4. Teste de Tukey para umidade dentro de teor de material volátil e carbono fixo de madeira torreficada de <i>Eucalyptus grandis</i>	28
Tabela 5. Comparação entre médias das propriedades da análise imediata que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade para madeira torreficada de <i>Eucalyptus grandis</i>	28
Tabela 6. Resumo das análises de variância para características físico-mecânicas <i>Eucalyptus grandis</i>	29
Tabela 7. Comparação entre médias das propriedades de perda massa e rendimento gravimétrico de material torreficado de <i>Eucalyptus grandis</i>	30
Tabela 8. Comparação entre médias da Tensão Máxima na compressão paralela às fibras que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade no processo de torrefação de <i>Eucalyptus grandis</i>	31
Tabela 9. Valores de “F” para densidade aparente e densidade energética para madeira torreficada de <i>Eucalyptus grandis</i>	31
Tabela 10. Comparação entre médias das propriedades de densidade energética de material torreficado de <i>Eucalyptus grandis</i>	32
Tabela 12. Resumo da análise de variância para análise imediata de material torreficado de <i>Pinus elliottii</i>	33
Tabela 13. Comparação entre médias dos teores de carbono fixo e material volátil e cinzas de madeira torreficada de <i>Pinus elliottii</i>	34
Tabela 14. Resumo das análises de variância para características físico-mecânicas de <i>Pinus elliottii</i>	35
Tabela 15. Comparação entre médias das propriedades de perda massa e rendimento gravimétrico e Tensão Máxima de material torreficado de <i>Pinus elliottii</i>	35
Tabela 16. Valores de “F” para densidade aparente e densidade energética de <i>Pinus elliottii</i>	35
Tabela 17. Comparação entre médias das propriedades de Densidade aparente e energética de material torreficado de <i>Pinus elliottii</i>	36
Tabela 18. Resumo das análises de variância para análise imediata de material torreficado de <i>Dinizia excelsa</i>	38
Tabela 19. Comparação entre médias dos teores de material volátil e cinzas para madeira torreficada de <i>Dinizia excelsa</i>	38
Tabela 20. Comparação entre médias de carbono fixo (%) que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade no processo de torrefação de <i>Dinizia excelsa</i>	39
Tabela 21. Resumo das análises de variância para características físico-mecânicas de <i>Dinizia excelsa</i>	39
Tabela 22. Resumo das análises de variância para características físico-mecânicas de <i>Dinizia excelsa</i>	40
Tabela 23. Resumo da análise de variância para característica física e energética de madeira torreficada <i>Dinizia excelsa</i>	40

Tabela 24. Comparação entre médias das propriedades de densidade aparente e energética que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade no processo de torrefação de <i>Dinizia excelsa</i>	41
--	----

1. INTRODUÇÃO

Com grande potencial para utilização de matrizes energéticas renováveis, sobretudo energia produzida a partir da hidroeletricidade e da biomassa (EPE, 2017) e, na posição de um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo, o Brasil pode aproveitar melhor a grande quantidade de biomassa produzida (DIAS et al., 2012), aumentando a sua participação na matriz energética nacional que atualmente representa 25,02% (EPE, 2017).

A biomassa é uma das fontes de energia renovável mais explorada no planeta, principalmente em países em desenvolvimento. Devido a sua abundância, renovabilidade e redução na emissão de gases do efeito estufa, a biomassa apresenta potencial para ser um recurso alternativo aos combustíveis fósseis. Mas, por se apresentar heterogênea, higroscópica, ter baixo teor de carbono fixo e baixa densidade, há dificuldade para seu uso eficiente, e, por isto, requer tratamentos prévios e/ou conversões para melhorar a qualidade energética. No Brasil, as áreas de florestas plantadas correspondem a 7,84 milhões de hectares, dos quais 5,7 milhões são eucalipto e 1,6 milhões são Pinus (IBÁ, 2017). A biomassa pode ser submetida a diversos processos de conversão transformando-se em outros combustíveis como o carvão vegetal, a madeira torreficada, o briquete e o pellet, entre outros.

Neste sentido é essencial a procura de tecnologias e métodos de conversão que tornem a biomassa um competitivo combustível nos mercados energéticos. A torrefação, uma alternativa promissora e viável, é um método de tratamento térmico a temperaturas relativamente baixas, até 300°C, que visa produzir um combustível com maior densidade energética (CHEN et al., 2015).

Com o processo de torrefação as propriedades físicas e químicas da biomassa variam com o incremento da temperatura. Para cada combinação de temperatura e tempo de processamento, obtêm-se produtos de diferentes propriedades que podem ser reproduzidos com alta precisão. A qualidade da biomassa tem influência nos produtos torreficados, sendo a densidade da madeira considerada o parâmetro de maior importância, está relacionada com a produção de energia, quanto maior a densidade, maior a quantidade de energia estocada por metro cúbico (KUMAR et al., 2011). Outro fator relevante é a umidade da biomassa, que, necessita de parte da energia liberada para a vaporização da água, pois quanto mais seca a matéria prima, mais energia estará disponível para uso.

De forma conjunta à torrefação, o uso da acústica, acoplado ao reator de torrefação,

pode aumentar as taxas de transferência de calor convectiva, observados em processos termo-acústicos (ZHOU et al., 2002; BENNETT et al., 2009). Este experimento consiste avaliar o efeito do campo de acústica dentro do reator de torrefação na modificação da velocidade de fluxo e pressão em torno da amostra de madeira, de forma perturbe a camada limite térmica sobre a amostra, gerando um campo de velocidade acústica que pode modificar a transferência de calor dentro da amostra, o que justificaria hipótese de condição de fronteira convectiva termo-acústica.

2. HIPÓTESE

A umidade influencia a forma como a acústica atua no processo de torrefação da madeira.

O uso da acústica melhora a eficiência do processo de torrefação e a qualidade do material torreficado.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo principal

Avaliar o efeito da acústica e da umidade no processo de torrefação com base nas características físicas e energéticas da madeira torreficada.

3.2. Objetivos secundários

1. Avaliar o efeito da acústica nas características físicas e energéticas das madeiras torreficadas;
2. Avaliar a influência da umidade no produto final torreficado sob efeito da acústica, considerando a condição a 0% de umidade e à 12% de umidade;

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Espécies de Madeira

4.1.1 Eucalyptus grandis

O *Eucalyptus* é um gênero importante no fornecimento de matéria-prima para diversas

finalidades industriais e suas espécies são as principais utilizadas para o fornecimento de biomassa para geração de energia (CORTEZ et al., 2009). A grande variabilidade da qualidade da madeira das diversas espécies e clones desse gênero e a adaptação às condições edafoclimáticas do Brasil, faz com que o eucalipto seja importante fornecedor de matérias-primas para a produção de lenha, carvão vegetal, celulose e papel (BRITO et al., 1983).

Esse gênero é um dos mais estudados e cultivados no Brasil e os conhecimentos de melhoramento genético, manejo do solo e nutrição de plantas tem sido utilizados para elevar suas potencialidades, proporcionando ganhos em produtividade e qualidade da madeira, plasticidade quanto a adaptação aos diferentes sítios florestais e exigências edafoclimáticas (PEREIRA et al., 2000; BOTREL et al., 2010).

A preferência por este gênero está associada à possibilidade de obtenção de vários produtos, à elevada taxa de crescimento e facilidade de rebrotação e às variações na densidade da copa, o que facilita a disponibilidade de radiação solar incidente no sub-bosque, viabilizando o estabelecimento das espécies forrageiras e, conseqüentemente, a sustentabilidade do sistema (OLIVEIRA et al., 2007). E também em razão de sua excelente produção volumétrica e da boa qualidade da madeira, resultante do intenso melhoramento genético realizado com a espécie e do manejo adequado dos povoamentos (GOULART et al., 2003).

No Brasil, as principais espécies do gênero, plantadas para produção de florestas energéticas são: *E. grandis* (FREDERICO, 2009), *E. urophylla* (ANDRADE, 2009), *E. camaldulensis* e *E. cloeziana* (PINHEIRO et al., 2005), quanto aos clones, aqueles com maior destaque são os híbridos de *E. urophylla* (I 220), híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* (I 042), híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* (I 144), híbrido de *E. urophylla* (I 224), híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* (GG100) e híbrido de *E. urophylla* x *E. camaldulensis* (VM 1) (FERNANDES, 2013); (ABRAF, 2012).

O *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden é uma espécie nativa do Norte de Nova Gales do Sul e da costa sul de Queensland, na Austrália (FAO, 1981). A madeira desta espécie é considerada medianamente leve e fácil de trabalhar em operações de usinagem, sendo considerada de baixa estabilidade dimensional e de elevada permeabilidade. Apresenta bom crescimento (CARVALHO, 2000) e tem alta produtividade se comparando com os outros eucaliptos (OLIVEIRA, 1997).

O *E. grandis* e os seus híbridos adquiriram grande importância na indústria nacional

de papel e celulose (CARVALHO, 2000). Segundo a Abm (2008), o desenvolvimento de sementes, híbridos e clones de eucalipto é preferencialmente direcionado para o setor de celulose, ficando em segundo plano o setor de biomassa para energia e carvão vegetal.

A densidade básica média da madeira de *E. grandis* determinada por Arango (2004) varia entre 0,46 a 0,54g/cm³ e para madeiras de 17 anos de idade Gonçalves et al. (2006) encontraram valores de 0,59 g/cm³.

4.1.2. *Dinizia excelsa*

É uma espécie não endêmica, clímax, uma das maiores árvores encontradas na floresta Amazônica, pertencente à família Leguminosae, denominada *Dinizia excelsa* Ducke. Ocorre naturalmente na região Amazônica, principalmente no Amazonas, Pará, Acre, Rondônia, Roraima e Amapá. Chega a atingir 50 a 60 m de altura e um diâmetro de 2 m ou mais. Na Amazônia, o nome angelim é atribuído a várias espécies de Leguminosae, principalmente dos gêneros *Dinizia*, *Hymenolobium*, *Vatairea* e *Vataireopsis* (EMBRAPA, 2004).

A madeira apresenta cerne marrom-avermelhado claro, pouco distinto do alburno cinza-avermelhado. Seus anéis de crescimento são distintos, sua grã reversa, textura média, brilho moderado e cheiro desagradável. Tem ótima resistência ao ataque de fungos e térmitas e boa resistência a insetos de madeira seca. A madeira é usada na construção civil e naval, dormentes, postes, torneados e outros (SOUZA et al., 1997). Apresenta densidade básica média variando de 0,83 g.cm⁻³ (IBDF, 1983) a 0,88 g.cm⁻³ (NASCIMENTO et al., 1997), densidade a 12% de umidade igual a 0,99 g.cm⁻³ e verde igual a 1,260 g.cm⁻³ (SOUZA et al., 1997).

4.1.3. *Pinus elliottii*

Esse gênero pertence à ordem Coniferae, do grupo das Gymnospermae (GILMAN e WATSON, 1994). A área de ocorrência natural vai da região polar até os trópicos, englobando os continentes da Europa, Ásia, América do Norte e Central, não ocorrendo naturalmente na América do Sul, engloba mais de 100 espécies com grande potencial a ser explorado, sendo que as mais difundidas são: *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

No Brasil, espécies desse gênero vêm sendo plantadas há mais de um século, tendo

sido, inicialmente introduzidas para fins ornamentais. Somente a partir da década de 1960 é que se iniciou o plantio de pinus em escala comercial, principalmente nas regiões sul e sudeste do país. A sua madeira é usada pelas indústrias de serrados e laminados, de chapas, de resina e de celulose e papel (AGUIAR et al., 2011).

Além desses usos, segundo Brand (2008), os galhos, serragem, cavacos e maravalha de pinus também são muito utilizados como recursos energéticos, as chamadas florestas energéticas.

O *Pinus elliottii* é uma espécie heliófila de crescimento rápido, que pode atingir alturas de 20 a 30 metros e diâmetro à altura do peito de 60 a 90 centímetros (MARCHIORI, 1996), é considerado de baixa exigência nutricional, apresenta crescimento rápido e alta produtividade na região sul do Brasil (KRONKA et al., 2005). A densidade básica média do *Pinus elliottii* encontra-se entre os valores de 0,47 g/cm³ (HILLIG et al., 2002) e 0,48 g/cm³ (HASELEIN et al., 2002).

4.2. Biomassa e energia

Biomassa é caracterizada como o conjunto de recursos biologicamente renováveis, originados de material vegetal, sendo uma forma de energia solar armazenada, isto é, as árvores usam a luz solar, na fotossíntese, para converter CO₂ e H₂O em produtos de alto teor energético, que são os carboidratos, podendo ser transformada em calor, eletricidade e força motriz. A origem da biomassa é diversificada podendo ser: resíduos industriais e agrícolas, sobras de madeira de operações florestais, resquícios de plantações, plantas energéticas como cana de açúcar e os cereais, plantas oleaginosas (MMA, 2015).

O Brasil é um dos poucos países que apresenta grande potencial para o uso e produção de biomassa para fins bioenergéticos, em função das grandes áreas de cultivo e intensa geração de resíduos lignocelulósicos (DIAS et al., 2012; ROUSSET et al., 2013). É o segundo país em área florestal, com 54,4% do território nacional ou 463 milhões de ha coberto por florestas. As áreas florestais são compostas de florestas naturais e plantadas; onde, 456 milhões de hectares correspondem às florestas naturais e 7,2 milhões de hectares correspondem a florestas plantadas (SFB, 2013).

Os produtos oriundos da floresta movimentam as exportações brasileiras, geram energia primária, além de possuir importância na área social, pois gera milhares de empregos diretos e indiretos, e trazem qualidade de vida à população pelos benefícios ambientais que

proporcionam (EMBRAPA, 2000). Segundo o Ibá (2017), o setor brasileiro de árvores plantadas foi responsável pela geração de R\$ 11,4 bilhões em tributos federais, estaduais e municipais em 2016, o que corresponde a 0,9% da arrecadação nacional, em 2016 com 510 mil empregos mantidos de forma direta pelo setor de árvores plantadas.

Segundo Moreira (2011) a biomassa florestal apresenta um grande potencial para geração de energia, com vantagens para a redução da emissão de gases do efeito estufa.

4.3. Características da Madeira

A madeira é um material heterogêneo e anisotrópico e suas características variam entre espécies, entre indivíduos de mesma espécie e dentro do indivíduo, Ela possui características químicas, físicas e anatômicas fundamentais para o uso energético; tais como a composição química imediata, densidade aparente, poder calorífico, densidade energética, umidade, entre outras.

A madeira tem uma estrutura formada por macromoléculas de celulose, um polissacarídeo formado por monômeros de glicose; hemicelulose, polissacarídeo de baixo peso molecular e baixo grau de polimerização e a lignina que é um composto fenólico; além de outros compostos que não fazem parte da sua estrutura como os extrativos que são solúveis em solventes orgânicos e responsáveis pela cor, cheiro e, resistência natural da madeira (ROWELL et al., 2005; BRITO E SILVA JR, 2005).

A madeira apresenta uma composição química elementar bastante uniforme entre as espécies em torno de 50% para o carbono, 6% de hidrogênio, 43% de oxigênio e 0,5% de nitrogênio (KLOCK et al., 2005).

Devido à sua higroscopicidade, o teor de umidade máximo que a madeira apresenta ocorre em uma faixa muito ampla, variando significativamente da casca até a medula e está inversamente relacionado com o poder de combustão, devido ao consumo de energia no processo de evaporação da água (CUNHA et al., 1989), em que exigem quantidades maiores de calor, quanto maior for o teor de umidade (OLIVEIRA, 1982).

A densidade da madeira é considerada o parâmetro de maior importância para sua qualificação e é definida como a quantidade de massa por unidade de volume e expressa por g.cm^{-3} ou kg.m^{-3} . Fundamentalmente a densidade é influenciada pela espessura da parede celular, tamanho da célula, interação entre estas variáveis e a presença de extrativos. Kollmann et al. (1975) e Vital et al. (1984) relataram que, quanto mais velha é a árvore, maior

é a sua densidade até uma certa idade e tal fato se deve ao espessamento das paredes celulares dos elementos estruturais.

Barrichelo et al. (1983) relataram que a densidade básica pode variar de acordo com a posição na árvore, tanto no sentido radial quanto no longitudinal, mostrando que a densidade tende a ser decrescente da base para o topo, em outras tende a ser crescente a partir do nível do DAP, podendo ainda, em outras espécies, apresentar valores alternados com a tendência decrescente e crescente.

A densidade energética é um importante parâmetro para combustíveis, pois, avalia a quantidade de energia armazenada em um determinado volume de material. A baixa densidade energética da biomassa em relação ao petróleo e o carvão mineral, implica em altos custo de transporte e armazenamento (COUTO et al., 2004) e nesse sentido, o uso de tratamentos que minimizem estes efeitos, como o tratamento térmico, são fundamentais para o aumento do uso da biomassa como fonte energética.

A composição química imediata da madeira é representada pelos materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Os materiais voláteis compreendem aos gases combustíveis e não combustíveis, como oxigênio, nitrogênio, metano, monóxido de carbono e hidrogênio que volatilizam rapidamente e contribuem de forma positiva para as propriedades energéticas. Os materiais voláteis nos combustíveis sólidos como a madeira são encontrados em quantidades que variam entre 76 e 86%, sendo responsável por grande parte do calor gerado na combustão (MORAIS et al., 2004). Valores ideais podem ser considerados acima de 80%, os quais facilitam a ignição do material e também sua queima (WERTHER et al., 2000).

O carbono fixo é a fração do material que se queima em estado sólido sendo composto principalmente por carbono, mas possui outros elementos como oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. Quando presente em alto índice nos combustíveis resulta na queima mais lenta destes, implicando maior tempo de residência nos aparelhos de queima, sendo desejável sua maior quantidade para melhorar energeticamente a biomassa (OLIVEIRA et al., 2010). Os minerais são constituintes inorgânicos e não participam do processo de combustão da biomassa e são conhecidos como cinzas (BRAND, 2010), sendo um parâmetro importante para a madeira e seus derivados, pois seu teor afeta negativamente o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos e podem causar danos nas estruturas dos queimadores e aumentar a frequência de limpeza destes (NEVES et al., 2013).

O poder calorífico e a densidade aparente são importantes parâmetros para avaliar a

potencialidade energética de combustíveis de biomassa (BRAND, 2010; FRIEDL et al., 2005). O poder calorífico é definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível. E a potencialidade energética pode ser determinada a partir da densidade energética obtida pelo produto entre o poder calorífico e a densidade aparente.

4.4. Torrefação

É um tratamento térmico à temperaturas relativamente baixas entre 200 e 300°C, onde ocorre a decomposição de parte das hemiceluloses gerando um produto combustível com maior densidade energética (PRINS et al., 2006). Esse tratamento é caracterizado pela ausência parcial ou completa de agentes oxidantes (ar), sendo uma fase inicial da pirólise que visa a produção de um combustível sólido.

Desse modo, o que diferencia a torrefação da carbonização é o caráter endotérmico das reações globais que ocorrem dentro da madeira sob aquecimento e o limite é próximo dos 300°C, quando as reações passam a ser exotérmicas e se inicia a produção de carvão. Assim a madeira torrificada ou torrefeita é um produto intermediário entre a madeira anidra e o carvão vegetal.

Nesse procedimento, a madeira começa a sofrer degradação térmica (alteração estrutural além da perda de água) propriamente dita a partir de 180°C com a liberação de dióxido de carbono, ácido acético e alguns compostos fenólicos (GIRARD & SHAH, 1991). Dos três principais componentes da madeira o primeiro a se degradar é a hemicelulose que inicia sua degradação à 225°C e está completamente degradada à 325°C (ROWELL et al., 2005). Já a partir dos 100°C alguns fenômenos ocorrem com a madeira e alteram suas características físicas e químicas, pois além da água ligada higroscopicamente, a madeira começa a perder a água de constituição (GOMES e OLIVEIRA, 1980). Em cada etapa da degradação térmica da madeira alguns produtos se destacam em relação a outros.

Sendo assim, em uma torrefação típica, 70% da massa permanece como produto sólido com 90% da energia inicial e 30% é formado por gases que contêm apenas 10% do conteúdo energético da biomassa (BERGMAN et al., 2005).

Segundo Prins et al.(2006) o processo de torrefação apresenta 55 a 60% de carbono, 5 a 5,5% de hidrogênio, 0,1 a 0,2% de nitrogênio e 35 a 38% de oxigênio na composição elementar. Com um poder calorífico de 5.200 a 6.000 kcal.kg⁻¹, a madeira torrificada situa-se

entre a madeira anidra (4.600kcal.kg^{-1}) e o carvão ($6.500\text{ kcal.kg}^{-1}$). A madeira torrificada retém de 70% a 90% da massa inicial e diminui de 80% para 60-75% seu teor de matérias voláteis e de 10% para 0-3% seu teor de umidade (PRINS et al., 2006).

As características da madeira torrificada variam principalmente em função da temperatura final do processo, mas também sofrem interferência do tempo sob tal temperatura, da velocidade de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira (FELFLI et al., 2000). Prins (2005) verificou que para uma mesma temperatura, quanto maior for o tempo da torrefação, maior será a perda em massa do material torrificado. Silva (2014) observou que o aumento de temperatura de torrefação tem relação positiva com as propriedades energéticas da madeira.

O tipo de biomassa também influencia os produtos torificados e, neste sentido, Zanzi (2004) observou que amostras de madeira resultaram em produtos mais sólidos e com menor produção de alcatrão e água que os produtos da torrefação de resíduos agrícolas.

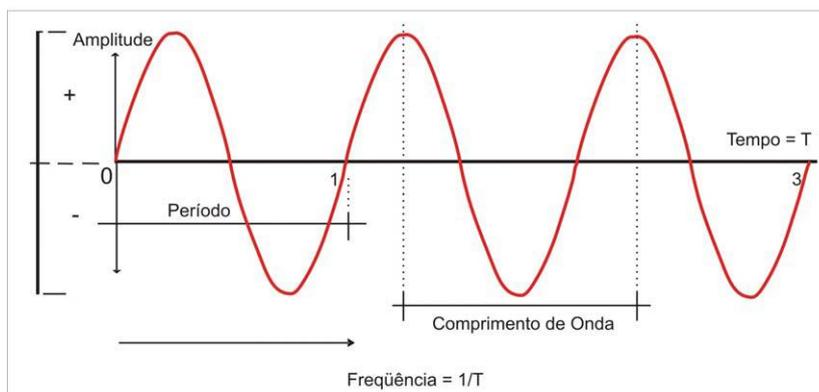
Dessa maneira, a padronização das características da madeira torrificada faz dela um combustível altamente competitivo (FELFLI et al., 2000) destacando algumas aplicações para este produto, como combustível de uso doméstico (lareiras, fornos a lenha, etc.) por possuir baixas emissões de fumaça durante a combustão, uso industrial em caldeiras para a produção de vapor, uso como redutor em processos metalúrgicos devido ao seu alto teor de carbono fixo e uso em gaseificadores.

Todas as propriedades da madeira sofrem alterações graduais de acordo com o aumento da temperatura. As principais alterações são o aumento da estabilidade dimensional, aumento da resistência a ataques de organismos xilófagos (insetos e fungos), diminuição da higroscopicidade, diminuição das propriedades mecânicas, aumento do poder calorífico e da friabilidade (ARAUJO et al., 2012).

4.5. Acústica

É uma área da física associada ao estudo do som, que pode ser entendido como uma sensação gerada através de uma perturbação (propagada sob a forma de ondas) na atmosfera, causada por um emissor (ex. alto-falante). Estas são ondas longitudinais, em que a direção de propagação coincide com a direção da vibração. Uma onda senoidal (Figura 1) representa o tipo mais simples de vibração, chamado movimento harmônico simples, caracterizado como som senoidal. Este seno de onda projetado no tempo em intervalos absolutamente regulares

demonstra uma onda em movimento de total homogeneidade e continuidade, em progressão contínua, periódica e regular e sua projeção forma uma giro de 360°C resultando um ciclo da onda (MENEZES, 2003).



Fonte: Adaptação de NEPOMUCENO (1977)

Figura 1. Visualização de uma onda senoidal

Os sons são representados graficamente por ondas periódicas e estas são caracterizadas por uma frequência, período, amplitude, comprimento de onda e velocidade. Comprimento de onda é o comprimento que as partículas do ar, num dado instante, ocupam no espaço, no período de uma onda, cuja unidade de medida é metro (m). Frequência é o número de vezes que o período ou comprimento de onda é repetido no intervalo de um segundo e a unidade de medida é o Hertz (Hz). Comprimento de onda e frequência são grandezas que estão diretamente relacionadas à velocidade de propagação do som no meio em que se está propagando. A velocidade é a distância que uma onda sonora percorre por unidade de tempo, sabendo-se que a velocidade do som é em média 343 m/s (MENEZES, 2003).

Amplitude é a pressão acústica em relação ao valor equivalente ao repouso, ou seja, é uma medida escalar negativa e positiva da magnitude de oscilação de uma onda. Quanto maior for a amplitude da onda de pressão, maior a densidade, pois o ar irá comprimir-se, provocando uma menor velocidade do som, mas, maior será a oscilação das partículas do ar e maior é a distância que o som pode percorrer (NEPOMUCENO, 1977). Neste sentido fica demonstrada a relação entre a pressão sonora que é uma tensão aplicada sobre uma superfície de grandeza escalar (Pascal), usada para caracterizar o efeito de ruídos sobre seres humanos (BISTAFA, 2006) e a velocidade acústica uma grandeza vetorial.

Período é o intervalo de tempo, em segundos, entre dois acontecimentos repetidos,

dentro da distância percorrida pela onda senoidal (NEPOMUCENO, 1977).

O uso da acústica já é utilizado em processos de combustão e pode aumentar as taxas de transferência de calor convectiva comparando-se com técnicas convencionais (ZINN, 1986). Neste sentido, foi observado aumento da transferência de calor em ebulição experimentalmente em um tubo de cobre circular horizontal em um campo acústico (ZHOU et al., 2002). Bennett et al. (2009) obtiveram resultado que demonstrou como a transferência de calor convectiva da seção de duto aquecida para o fluxo interno é melhorada devido a excitação acústica.

A indução das oscilações é feita por meio de alto-falantes estrategicamente posicionados e a amostra é excitada acusticamente dentro do queimador onde as frequências e amplitudes atuam. Estudo mostra que a presença da atuação acústica interfere fortemente no processo de combustão e isto pode ser observado pelos perfis de temperatura na chama que variam fortemente em função de combinações de frequências e amplitudes (RIBEIRO, 2002). Outro estudo observou que a estrutura da chama é sensível à frequência de oscilação, o que acaba por influenciar todo processo de combustão, de forma que altera a região onde se desenvolve as reações químicas (LACAVA et al., 1999).

5. MATERIAL E METODOS

5.1. Material utilizado

As amostras utilizadas foram dimensionadas à 3x3x3 cm e orientadas conforme as seções longitudinais, tangenciais e radiais (Figura 2) de madeiras de *Eucalyptus grandis* aos 15 anos de idade originário de plantio da Fazenda Água Limpa de propriedade da Universidade de Brasília, madeira de *Dinizia excelsa* Ducke (Angelim vermelho) adquirida no comércio local de Rialma-GO e madeira de *Pinus elliottii* oriundo da Embrapa nas proximidade de plantaltina (DF), as quais foram submetidas a secagem por 24 horas em estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para condições de 0% e a sala de climatização durante 3 meses para 12% de teor de umidade.

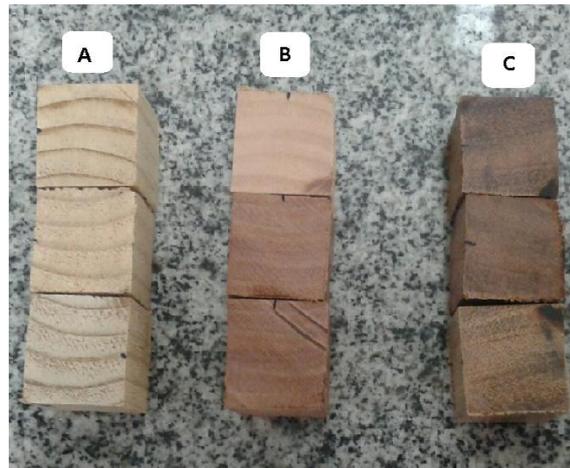


Figura 2. Amostras de 3x3x3cm orientadas das madeiras de (A) *Pinus elliottii*, (B) *Eucalyptus grandis* e (C) *Dinizia excelsa* Ducke.

5.2. Produção do material torreficado

Os corpos de provas na umidade de 0 e 12% foram submetidos aos ensaios de torrefação, o quais foram realizados na área de Energia de Biomassa do LPF em um reator que possibilita criações de diferentes rampas e patamares de aquecimento, medições em tempo real de perda de massa, controle do teor de oxigênio, por meio de injeção de nitrogênio e análise das temperaturas dentro e na superfície da amostra a cada 60 segundos a quais foram transmitidas ao software Labview (Figura 3).

Para obtenção da perda de massa foi colocada uma amostra sobre o suporte em contato com a balança e para a obtenção das temperaturas internas e superficiais foi colocado uma amostra suspensa através de dois termopares (Figura 5). A temperatura do reator limita-se a 320°C.

As ondas acústicas foram geradas por um alto-falante localizado na parte superior e externa do reator emitidas para um tubo que faz a conexão para dentro do reator por meio de uma abertura localizada na parte superior do reator, na frequência de 2478 hertz e a amplitude constante de 10 volts, Com base em resultados encontrados por Silveira et al. (2017) em estudo de Coupling of an acoustic emissions system to a laboratory torrefaction reactor. Sendo esta uma onda senoidal o tipo mais simples de vibração, cuja frequência segundo EGAN (1988) é classificada como Tons puros (composto por uma única frequência).

O reator de torrefação é mostrado na figura 4, o ensaio foi realizado com taxa de aquecimento de 5°C por mim, temperatura final de 250°C e tempo na temperatura final de 60

minutos, conforme Rodrigues & Rousset (2009).

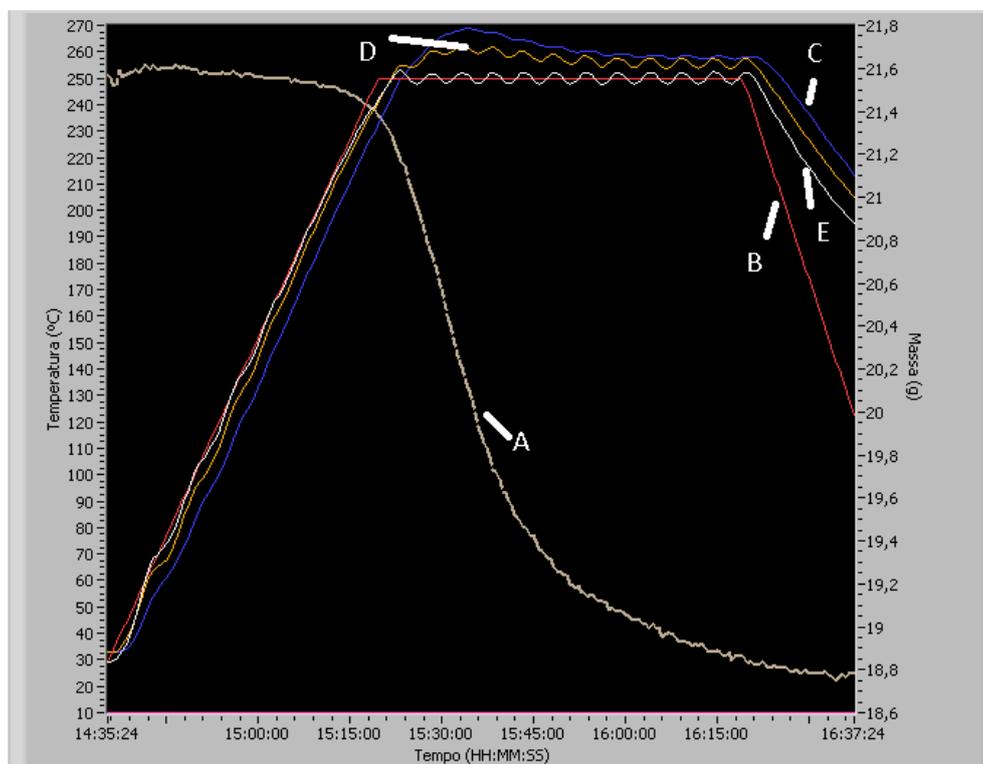


Figura 3. Gráfico gerado por software labview. A) Perda de massa em tempo real; B) Patamar e rampas determinados para estes ensaios; C) Temperatura superficial da amostra; D) Temperatura interna da amostra; E) Temperatura de controle do reator.

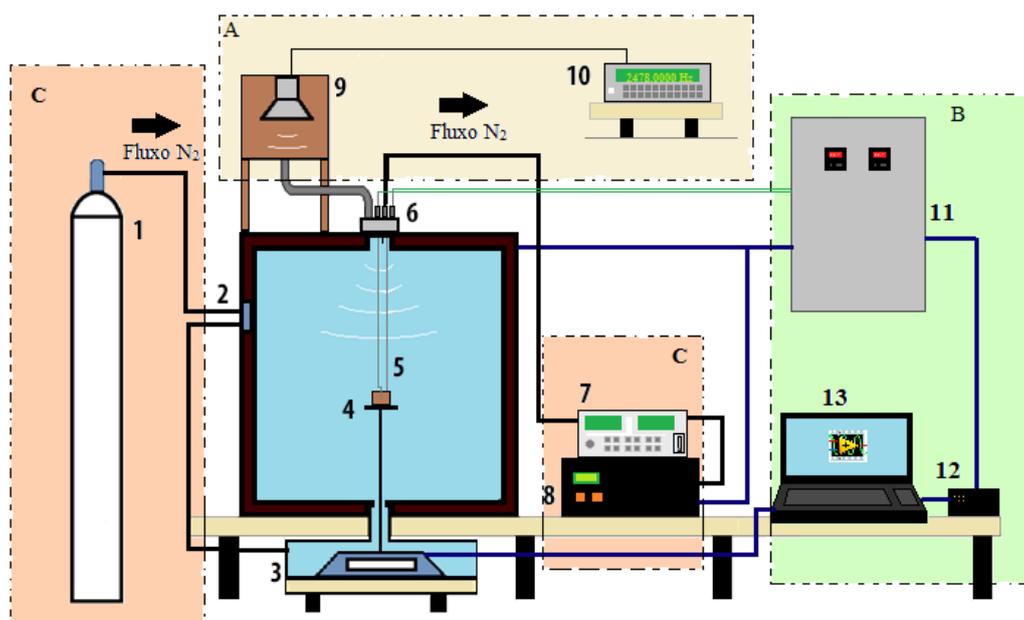


Figura 4. Esquema de um reator de torrefação. Fonte: Edgar Amaral Silveira, Doutorando em Ciências Mecânicas – Unb.

Legenda:

- 1) Cilindro de Nitrogênio; 2) Válvula solenoide de controle do fluxo N₂; 3) Balança; 4) Amostra; 5) Reator de Torrefação (Estufa adaptada); 6) Termopares (Centro e Superfície); 7) Bomba de fluxo; 8) Controlador do nível de N₂; 9) Alto Falante; 10) Gerador de Sinais; 11) Quadro de comando; 12) Gantner (comunicação com o CPU); 13) Computador (Labview).

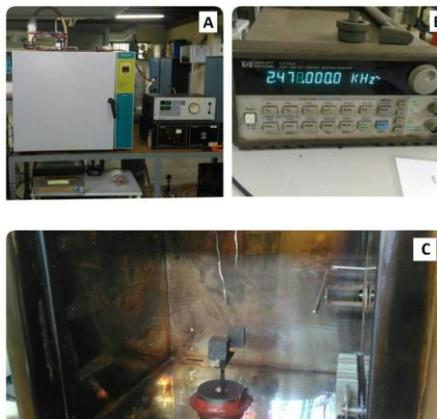


Figura 5. Equipamentos utilizados na produção da madeira torrificada com acústica: A) Reator de torrificação em funcionamento, B) Gerador de sinais na frequência utilizada, C) Amostras torrificadas sobre suporte da balança e suspensa através de termopares.

5.3. Análise estatística

O arranjo estabelecido para esta pesquisa consistiu na combinação de 2 fatores, onde foi analisado a interação entre: 2 umidades – 0 e 12%; 2 métodos de transformação – com acústica e sem acústica, resultando em ensaio fatorial 2 x 2 realizado para cada uma das espécies estudadas (*Pinus elliotti*, *Eucayptus grandis* e *Dinizia excelsa* Ducke) . Para cada tratamento foram confeccionados 10 corpos de provas, 5 repetições.

Os resultados dos ensaios foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e ao teste de homogeneidade das variâncias de Bartlett e a análise de variância (ANOVA) para verificação dos efeitos significativos a 5% de probabilidade de erro. Os resultados foram analisados segundo um delineamento inteiramente casualizados para os tratamentos. As médias dos tratamentos foram comparadas, pelo teste Tukey.

5.4. Caracterização da madeira

Densidade aparente

Para a obtenção da densidade aparente, os corpos-de-prova tiveram suas dimensões longitudinais, tangenciais e radiais aferidas com paquímetro com sensibilidade de 0,01 cm, e a massa obtida em balança semi-analítica com sensibilidade de 0,01g (Figura 6) (ABNT 9165, 1985) utilizando a Equação 1.

$$D_{ap} = \frac{M_u}{V_u} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

D_{ap} : densidade aparente específica, g/cm³;

M_u : massa do corpo-de-prova a 0% e 12% de umidade, g;

V_u : volume do corpo-de-prova a 0% e 12% de umidade, cm³ .



Figura 6. Determinação da massa (A) e das dimensões (B) das amostras de madeira para o cálculo da densidade aparente nas madeiras “in natura” e torrificadas.

Compressão paralela às fibras

O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado em uma máquina EMIC – DL 30.000 para ensaios mecânicos (Figura 7), instalada no laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Engenharia. Florestal da Universidade de Brasília (Unb). O ensaio

consistiu na aplicação contínua de carga em corpos-de-provas de seção quadrada até o seu rompimento e forneceu dados para a determinação da resistência máxima da madeira “in natura” e torrificada e é um indicativo de qualidade.

Os testes foram realizados para comparação entre tratamentos e não para caracterização das espécies, desta forma seguiu-se a norma ASTM D143/2000 com adaptação quanto às dimensões do corpo de prova, cuja área da seção foi de 900 mm².

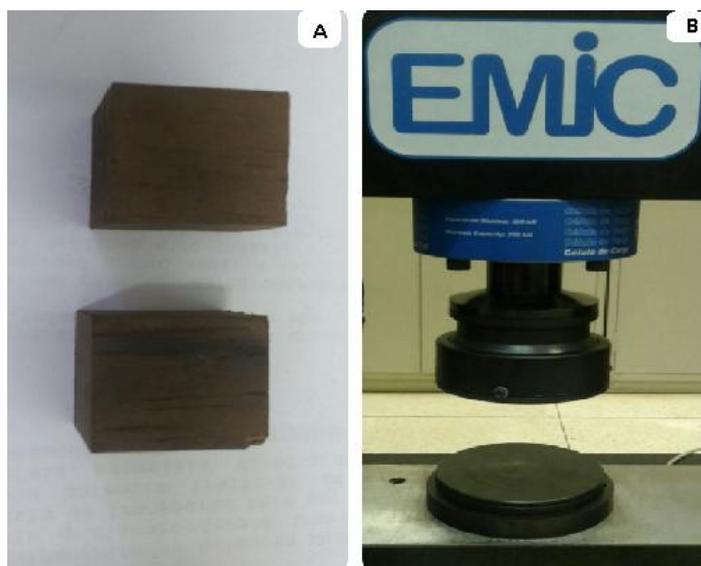


Figura 7. Amostras torrificadas (A) e Máquina EMIC– DL 30.000 (B) para a determinação da compressão paralela às fibras.

Preparo das amostras para análise imediata e poder calorífico

As amostras de madeira “in natura” e torrificada foram trituradas e moídas em moinho de facas do tipo willey e na sequência submetidas a uma separação mecânica no classificador de peneiras (Figura 8).

O material foi levado ao agitador eletro-magnético para a classificação granulométrica por peneiras de 20 mesh, 40 mesh, 60 mesh, 100 mesh, 170 mesh e coletor, após a classificação o material retido na peneira de 100 mesh foi coletado para realização da análise química imediata e poder calorífico.



Figura 8. Preparo das amostras para caracterização química e poder calorífico. A) Moinho de facas do tipo willey. B) Agitador eletro-magnético de peneiras.

Caracterização da biomassa

Para determinação da química imediata o material foi analisado de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986) para determinação dos teores de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo. Para os ensaios de poder calorífico foi utilizada a norma ABNT NBR 8633 (1984).

O teor de materiais voláteis (Figura 9) foi determinado a partir de 1,0 g de material moído e peneirado (< 60 mesh), seco a 0%. A amostra foi colocada em um cadinho de porcelana com a tampa, previamente seco e tarado, em seguida colocado em forno mufla com uma rampa e um patamar a $900 \pm 10^\circ\text{C}$ por 10 minutos, sendo 3 minutos na tampa da mufla e na sequência 7 minutos no interior da mufla com porta fechada. Após esse período as amostras foram retiradas da mufla, esfriadas no dessecador e pesadas. A diferença entre duplicatas não pode ultrapassar 2 %. O teor de material volátil foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$MV: \frac{M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}}{M_{\text{amostra}}} * 100$$

Eq. (2)

Em que:

MV: Teor de materiais voláteis do carvão vegetal (%);

M inicial: Massa inicial do cadinho + amostra (g);

M final: Massa final do cadinho + amostra (g);

M amostra: amostra inicial (g)

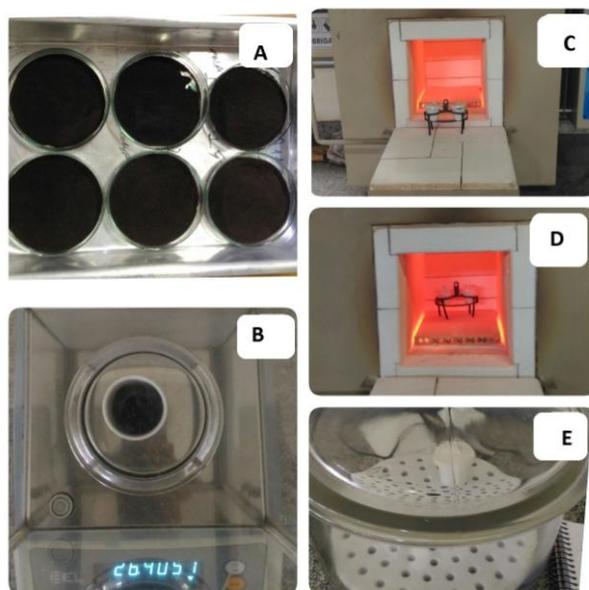


Figura 9. Sequência para obtenção de dados para a determinação do teor de materiais voláteis. A) Amostras moídas, classificadas e secas a 0% de umidade. B) Pesagem de um grama do material. C) Amostras na tampa da mufla. D) Amostras no interior da mufla. E) Amostras no dessecador.

O teor de cinzas (Figura 10) foi obtido a partir de 1,0 g de material moído e peneirado (< 60 mesh), seco a 0%. A amostra foi colocada em um cadinho de porcelana sem tampa, previamente seco e tarado, em seguida colocado em forno mufla com uma rampa e um patamar a $700 \pm 10^\circ\text{C}$, por um período de cinco horas até a completa calcinação. Após esse período as amostras foram retiradas da mufla, resfriadas no dessecador e pesadas e, com precisão de 10%. O teor de cinzas foi obtido pela Equação 3.

$$CZ: \frac{M_{final} - M_{cadinho}}{M_{amostra}} * 100 \quad \text{Eq.(3)}$$

Em que:

CZ: Teor de cinzas no carvão, em %;

M final: Massa final do cadinho + amostra (g);

M cadinho: Massa do cadinho (g);

M amostra: amostra inicial (g)

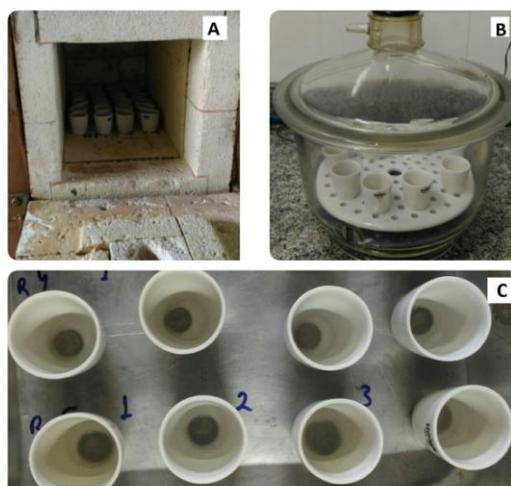


Figura 10. Sequência para obtenção de dados para a determinação do teor de cinzas. A) Amostras inseridas na Mufla. B) Após ensaio amostras em dessecador. C) Cinzas de biomassa de *Pinus elliottii*.

Teor de carbono fixo é uma medida indireta, calculado através da seguinte Equação 4.

$$CF: 100 - (CZ + MV) \quad \text{Eq.(4)}$$

Em que:

CF = Teor de carbono fixo em %;

CZ = Teor de cinzas em %;

MV = Teor de materiais voláteis em %;

O poder calorífico superior (PCS) (Figura 11) para as biomassas foi determinado a partir de aproximadamente 1 grama de material moído (60 mesh) e 0,7 g para madeira torreficada, seco a 0% e peletizado, por meio de uma bomba calorimétrica da PARR modelo 6400 – Automatic Isoperibol Calorimeter, conforme a norma ABNT NBR 8633, com precisão 29 MJ/Kg de diferença entre os ensaios.

O poder calorífico inferior foi obtido a partir do poder calorífico superior, pela Equação 5.

$$PCI = PCS - \left(600 * \frac{9H}{100}\right) \quad \text{Eq.(5)}$$

O poder calorífico útil foi obtido a partir do poder calorífico inferior, pela Equação 6.

$$PCU = PCI * (1 - U) - 600 * U \quad \text{Eq.(6)}$$

Em que:

PCS: poder calorífico superior (kcal/kg);

PCI: Poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCU: Poder calorífico útil (kcal/kg);

H: Hidrogênio empreso em (%);

U: Umidade empreso em base úmida (%).

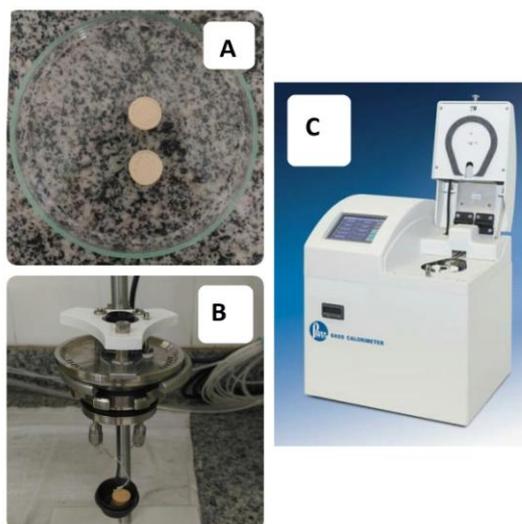


Figura 11. Sequência de obtenção de dados para a determinação do poder calorífico. A) Material moído peletizado. B) Introdução da amostra e do fio de lã para realização do ensaio C) Bomba calorimétrica.

A análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio foi determinada a partir de aproximadamente 3 gramas de material moído (60 mesh), seco a 0%. Foi obtida por meio de um analisador elementar CHNS da marca Perkin Elmer modelo EA 2400 series II (Figura 12), o qual possui dois modos de análise: CHN e CHNS, o sistema conta com um forno de alta temperatura para completa combustão das amostras, retenção seletiva dos gases (separação

por cromatografia frontal) e detecção dos gases por TCD (detector de condutividade térmica). O oxigênio foi obtido pela diferença, utilizando as porcentagens de carbono, hidrogênio, nitrogênio e subtraindo 100%.



Figura 12. Analisador elementar CHNS Perkin Elmer modelo EA 2400.

5.5. Caracterização do material torreficado

O poder calorífico superior, a densidade energética, a compressão paralela às fibras, a análise elementar e a análise imediata foram realizadas conforme metodologia descrita no item 5.2 para a biomassa “in natura”.

Densidade energética

A densidade energética foi calculada a partir do produto entre o valor do poder calorífico útil e a densidade aparente no mesmo teor de umidade, conforme a Equação 7.

$$DE = PCU * DA \quad \text{Eq.(7)}$$

Em que:

DE = Densidade energética expressa em Mcal.m^{-3} ;

PCU = Poder calorífico útil expresso em kcal.kg^{-1} na umidade “u”;

DA = Densidade aparente expressa em kg.m^{-3} na umidade “u”.

Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico foi calculado pela razão entre a massa de madeira torrificada e a massa de madeira antes da torrefação, a 0 e 12% de umidade, de acordo com a Equação 8.

$$RG: \frac{M_{\text{torr}}}{M_{\text{seca}}} * 100 \quad \text{Eq.(8)}$$

Em que:

RG = Rendimento Gravimétrico em %

M torr = Massa em material torrificado (kg)

M seca = Massa de madeira (0 e 12% U) (kg)

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS DE *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* E *Dinizia excelsa*

Os resultados médios das características químicas, elementares, energéticas e mecânicas das madeiras de *E. grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa* são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios das características químicas, elementares, energéticas e mecânicas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa*.

Espécie	CZ (%)	MV (%)	CF (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	PCI (kcal.kg)	TM (kgf.cm ⁻²)
<i>E. grandis</i>	0,078	81,39	18,52	46,03	6,19	0,13	47,65	4473,9	1211,51
<i>Pinus elliotti</i>	0,151	85,27	14,57	46,45	6,51	0,16	46,88	4490,9	679,3
<i>Dinizia excelsa</i>	0,177	75,91	23,91	48,02	6,15	0,24	45,41	4.698	1.229

CZ: Teor de cinzas; MV: Teor de Materiais Volateis; CF: Teor de carbono fixo; C: Teor de carbono; H: Teor de Hidrogênio; N: Teor de Nitrogênio; PCI: Poder Calorífico Inferior; TM: Tensão Máxima.

6.1.1. *Eucalyptus grandis*

A madeira de *E. grandis* apresentou teores médios de carbono fixo, cinzas e materiais

voláteis de 18,52, 0,078 e 81,39% , respectivamente. Valores entre 80,30 e 83,23% para carbono fixo, 14,91 e 19,50% para materiais voláteis e entre 0,62 e 1,23% para cinzas foram encontrados por Eloy et al. (2016) em estudo com madeira de *E. grandis* em diferentes idades e espaçamentos de plantio. Segundo Viera et al.(2013), maior conteúdo de materiais voláteis interfere positivamente facilitando a ignição.

O poder calorífico inferior obtido foi de 4.473,9 kcal.kg⁻¹, valor superior ao registrado por alguns autores, como Eloy et al. (2016) que obtiveram poderes caloríficos inferiores variando entre 3.988 e 4.205 kcal.kg⁻¹ e Grassmann et al. (2016), que encontraram poder calorífico inferior de 4.226 kcal.kg⁻¹ para cavacos de *Eucalyptus spp.*

No teste de compressão paralela às fibras a madeira de *E. grandis* apresentou tensão máxima de 1.211,51 kgf.cm⁻² em corpo de prova de 3x3x3cm com velocidade 0,6 mm/min. Rodrigues (2009), trabalhando com a mesma espécie, porém com corpo de prova de 2x4x8cm e velocidade de 0,24 mm/min encontrou tensão máxima de 772,98 kgf.cm⁻². Menores corpos de provas utilizando maiores velocidades alcançam maiores resistências do que maiores corpos de provas utilizando menores velocidades como observado por Melo (2010) em madeira de Cumaru.

A análise elementar revelou que a madeira de *E. grandis* apresenta uma composição percentual média: 46,03% de C; 6,19% de H; 47,65% de O e 0,13 % de nitrogênio. Valores semelhantes foram encontrados por Soares et al. (2014), que relataram para híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com idades de três, cinco e sete anos teor de carbono variando de 43,97 a 45,60%, teor de hidrogênio de 6,18 a 6,17%, e teor de oxigênio variando de 47,75 a 49,22% corroborando com os encontrados neste trabalho. Pereira et al. (2013) em estudo com madeiras de seis clones de *Eucalyptus* com 90 meses de idade encontraram teores de nitrogênio, variando de 0,09% a 0,12%, enquanto Neves et al. (2011) trabalhando com clones de *Eucalyptus* com 68 meses de idade relataram teores variando de 0,08% a 0,21%.

6.1.2. *Pinus elliottii*

Os teores médios de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis encontrados para madeira de *Pinus elliottii* foram de 14,57, 0,151 e 85,27%, respectivamente. Souza et al. (2012) trabalhando com resíduos de colheita de madeira e pó de serra de *Pinus taeda* encontraram valores de 13,44 e 14,06% para carbono fixo, 0,20 e 0,31% para cinzas e 85,09 e 86,14% para materiais voláteis, respectivamente. Péres et al. (2015) encontrou, para *Pinus*

radiata, 15,17% para carbono fixo, 0,30% para cinzas e 77,71% para materiais voláteis.

O poder calorífico inferior obtido foi de 4.490,9 kcal.kg⁻¹, valor próximo ao encontrado por Souza et al. (2012) de 4.423 kcal.kg⁻¹ para pó de serra e 4.578 kcal.kg⁻¹ para resíduos de colheita de madeira de *Pinus taeda*, 4.462 kcal.kg⁻¹ encontrado por Quirino et al. (2004) para *Pinus elliottii*, 4.551 kcal.kg⁻¹ para cavacos de *Pinus spp* encontrado por Grassmann et al. (2016) e 4.491 kcal.kg⁻¹ encontrado por Protassio et al (2015) para madeira residual de pinus.

A tensão máxima na compressão paralela às fibras obtida para madeira de *Pinus elliottii* foi 679,3 kgf.cm⁻² em corpo de prova de 3x3x3 cm, enquanto Almeida & Dias (2016) encontraram 342,62 kgf.cm⁻² para a mesma espécie, porém trabalhando com corpo de prova 5x5x10 cm, observando que menores corpos de provas alcançam maiores resistências que maiores corpos de provas (MELO, 2010). A análise elementar desta madeira revelou uma composição percentual média de 46,45 % de C; 6,51 % de H; 46,88 % de O e 0,16 % de N, conforme Tabela 1. Hill et al (2013) trabalhando com *Pinus radiata* encontraram valores de 46,3 % de C; 6,2 % de H e 47,5 % de O e Péres et al. (2015) encontraram valores de 48,94% de C; 6,91 % de H; 44,03 % de O e 0,12 % de N.

6.1.3. *Dinizia excelsa*

Na madeira de *Dinizia excelsa* foram observados teores médios de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis de 23,91, 0,177 e 75,91%, respectivamente. Netto et al. (2006) trabalhando com *Dinizia excelsa* encontram valores semelhantes de carbono fixo 20,34%, cinzas 0,04% e materiais voláteis 79,61%.

O poder calorífico inferior obtido foi de 4.698 kcal.kg⁻¹, Netto et al. (2006) obtiveram valor de 4557 kcal.kg⁻¹ para mesma espécie, A tensão máxima na compressão paralela às fibras encontrada foi de 1.229 kgf.cm⁻² obtida em corpo de prova 3x3x3, enquanto, para mesma espécie, porém em corpo de prova de 5x5x15 cm Moreira et al. (2017) encontraram 795,38 kgf.cm⁻² observando que menores corpos de provas alcançam maiores resistências que maiores corpos de provas (Melo, 2010).

A análise elementar revelou que a madeira de *Dinizia excelsa* Duke apresenta uma composição percentual média: 48,02 % de C; 6,15 % de H; 45,41 % de O e 0,24 % de N. Valores semelhantes foram encontrados por Castro et al. (2015) para a espécie angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke): teor de carbono 47,87%, teor de hidrogênio 6,06 %, teor de oxigênio 44,87% e 1,16% de nitrogênio corroborando os resultados encontrados neste

trabalho.

6.1.4. Características elementares e energéticas das madeiras torrificadas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa*

Os valores médios da análise elementar e do poder calorífico útil das madeiras torrefeitas de *E. grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa* são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Médias dos atributos elementares e energéticos dos tratamentos oriundos da torrefação de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Dinizia excelsa*.

Espécies	Fatores		C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	PCU (kcal.kg ⁻¹)
	Acústica	Umidade					
<i>E. grandis</i>	Sem	0%	52,27	5,61	0,27	41,85	4.801
	Sem	12%	52,07	5,59	0,17	42,17	4.776
	Com	0%	52,48	5,46	0,27	41,76	4.865
	Com	12%	52,61	5,53	0,25	41,61	4.807
<i>Pinus elliottii</i>	Sem	0%	51,78	5,24	0,28	42,7	4.899
	Sem	12%	53,79	5,5	0,26	40,45	5.024
	Com	0%	52,2	5,47	0,24	42,09	4.840
	Com	12%	54,75	5,04	0,27	39,94	5.023
<i>Dinizia excelsa</i>	Sem	0%	54,26	5,44	0,38	39,92	5.130
	Sem	12%	55,03	5,51	0,4	39,06	5.104
	Com	0%	54,12	5,39	0,38	40,11	5.119
	Com	12%	54,02	5,42	0,35	40,21	5.043

C: Teor de carbono; H: Teor de Hidrogênio; N: Teor de Nitrogênio; O: Teor de Oxigênio; PCU: Poder Calorífico Util.

Os tratamentos com e sem acústica a 0% e 12% de umidade em *E. grandis* apresentaram valores de carbono variando entre 52,07 e 52,61%, hidrogênio entre 5,46 e

5,61%, nitrogênio entre 0,17 e 0,27% e oxigênio entre 41,61 e 42,17%, não havendo variação significativa entre eles. Outros pesquisadores encontraram valores semelhantes, como Borges et al. (2016) que encontraram para cavacos torrefeitos de *E. grandis* com 0% de umidade e temperatura de 250°C, 47,35% de carbono, 6,11% de hidrogênio, 0,12% de nitrogênio e 46,76% de oxigênio, enquanto Pinto et al. (2017) trabalhando com *Eucalyptus globulus* torrefeito a 250°C encontraram 51,1% de carbono, 5,0 de hidrogênio, 0,3 de nitrogênio e 43,6 de oxigênio. O poder calorífico útil de *E. grandis* variou entre 4.776 e 4.865 kcal.kg⁻¹, com destaque para o tratamento com a presença de acústica e 0% de umidade. Grassmann et al. (2016), encontraram poder calorífico útil de 4.823 kcal.kg⁻¹ para cavacos torrefeitos de *Eucalyptus* spp a 280°C próximo ao encontrado neste estudo. Santos (2012) encontraram em biomassa de eucalipto torrefeito a 250°C valor médio de 4.961 kcal.kg⁻¹. Os tratamentos com e sem acústica a 0% e 12% de umidade em *Pinus elliotii* apresentaram valores de carbono variando entre 51,78 e 54,75 %, hidrogênio entre 5,04 e 5,5 %, nitrogênio entre 0,24 e 0,28% e oxigênio entre 39,94 e 42,7%, Hill et al. (2013) em torrefação de *Pinus radiata* a 260°C, taxa de aquecimento de 8°C/min e tempo final de 60 min encontraram valores de 50,5 % de C; 5,8 % de H e 43,6 % de O próximos aos encontrados neste estudo e para torrefação a 300°C, taxa de aquecimento de 8°C/min e tempo final de 30 min encontraram valores de 54,2 % de C.O poder calorífico útil de *Pinus elliotii* variou entre 4.840 e 5.024 kcal.kg⁻¹, com destaque para o tratamento com e sem a presença de acústica a 12% de umidade. Grassmann et al. (2016), encontraram poder calorífico útil de 4.954 kcal.kg⁻¹ para cavacos torrefeitos de *Pinus* spp a 280°C próximo ao encontrado neste estudo. Protassio et al. (2015) encontrou 4.910 kcal.kg⁻¹ para pellets torreficados a 250°C de *Pinus* sp.

Os tratamentos com e sem acústica a 0% e 12% de umidade da *Dinizia excelsa* Duke apresentaram valores de carbono variando entre 54,02 e 55,03 %, hidrogênio entre 5,39 e 5,51%, nitrogênio entre 0,35 e 0,4 % e oxigênio entre 39,06 e 40,21%. O poder calorífico útil variou entre 5.043 e 5.130 kcal.kg⁻¹, com destaque para o tratamento sem acústica a 0% de umidade.

Kim et al. (2015) trabalhando com cavacos torreficados de acácia (*Acacia mangium*) e albizia (*Paraserianthes falcataria*) a 250°C com densidade básica de 500 kg.m⁻³, observaram valores de carbono variando entre 52,01 e 50,56 %, hidrogênio entre 5,76 e 5,82 %, nitrogênio entre 0,29 e 0,12 %, oxigênio entre 26,44 e 23,61% e poderes caloríficos superior variando 4661 e 4566 kcal.kg⁻¹. Carneiro Junior (2015) em estudo de madeira

torreficada de algaroba (*Prosopis juliflora*) a 230 e 270°C, com densidade básica de 836 kg.m⁻³, observaram valores semelhantes de carbono variando entre 49,73 e 61,16 %, hidrogênio entre 5,95 e 5,64 %, nitrogênio entre 0,24 e 0,02 %, oxigênio entre 44,08 e 33,19 % e poderes caloríficos variando 4460 e 5206 kcal.kg⁻¹

6.2. EFEITO DA ACÚSTICA E DA UMIDADE NA TORREFAÇÃO DE *Eucalyptus grandis*

Os resultados obtidos através da análise imediata realizada com as amostras torreficadas permitiram avaliar o efeito da acústica. Quando analisado os fatores isoladamente (Tabela 3), observou-se influência significativa da umidade nos teores de material volátil e carbono fixo. Por outro lado observou-se que a interação entre os fatores, acústica e umidade foi significativa apenas para o teor de cinzas.

Tabela 3. Valores de “F” para análise imediata de material torreficado de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	Grau de liberdade	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Acústica (A)	1	0,0473 ^{ns}	0,8028 ^{ns}	0,0621 ^{ns}
Umidade (U)	1	45,7592**	3,5183 ^{ns}	48,9885**
A x U	1	0,7414 ^{ns}	0,0000**	0,7473 ^{ns}
Resíduo	16			
Coeficiente de variação		1,09	28,89	3,59

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5% pelo teste F.

O teste de média para o fator umidade foi analisado isoladamente considerando o teor de material volátil e teor de carbono fixo (Tabela 4). Foram observados valores de 24,09% de carbono fixo para teores de umidade de 12%, semelhante à valores de 24,65% encontrado por Rodrigues (2009) para a mesma espécie e próximo de 22,2% encontrado por Silva (2013), ambos trabalhando na mesma condição de umidade a 0%. Nesta condição de 0% umidade o teor de material volátil foi de 77,28%, semelhante ao valor de 77,04% encontrado por Silva (2013) para resíduo de eucalipto torreficado a 200°C e próximo ao valor de 77,19% encontrado por Rodrigues (2009) na torrefação de madeira de mesma espécie.

Canal et al. (2016) estudando o efeito da umidade nas emissões de gases durante a carbonização observaram que umidade na madeira desacelera o processo de degradação e, com isto, aumenta a produção desses compostos. Na madeira torreficada de *Eucalyptus*

grandis observou-se uma diminuição do teor de material volátil e um aumento do teor de carbono fixo (Tabela 4).

Tabela 4. Teste de Tukey para umidade dentro de teor de material volátil e carbono fixo de madeira torreficada de *Eucalyptus grandis*.

Variáveis	Material Volátil (%)		Carbono Fixo (%)	
	0%	12%	0%	12%
Umidade	0%	77,2878 a	22,6487 b	
	12%	75,8588 b	24,0913 a	

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

O teste de média considerando a interação: acústica versus umidade, para o teor de cinzas encontra-se na Tabela 5. Corroborando com esse estudo, observaram teores inferiores ao encontrado por Silva (2013), em torrefação de resíduo eucalipto. Os baixos teores de cinzas diminuem as influências negativas sobre o poder calorífico (PINCELLI, 2011).

Em relação ao teor de cinzas da biomassa “in natura” (Tabela 1), foi observado um decréscimo que pode ser atribuído a heterogeneidade da amostra e a fração da madeira não totalmente torrefeita (Tabela 5) (RODRIGUES, 2009).

Tabela 5. Comparação entre médias das propriedades da análise imediata que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade para madeira torreficada de *Eucalyptus grandis*.

Propriedades	Acústica	Umidade (%)	
		0	12
Cinzas (%)	Sem	0,0602 (0,01) aA	0,0466 (0,01) aA
	Com	0,0667 (0,02) aA	0,0531 (0,01) aA

Obs: Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Os valores entre parênteses correspondem a desvio padrão.

Na Tabela 6 estão os valores de “F” para a tensão máxima na compressão paralela às fibras, a perda de massa e o rendimento gravimétrico, quando se analisam as variáveis, acústica e umidade. Para a perda de massa e rendimento gravimétrico, apenas o efeito isolado da umidade foi significativo. Mas para tensão máxima na compressão paralela às fibras observou-se que tanto a interação entre estas variáveis quanto o efeito isolado delas foi significativo.

Tabela 6. Resumo das análises de variância para características físico-mecânicas *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	Grau de liberdade	Tensão Máxima (kgf/cm ³)	Perda de massa (%)	Rendimento gravimétrico (%)
Acústica (A)	1	95,3828**	0,0584 ^{ns}	0,0584 ^{ns}
Umidade (U)	1	60,4115**	9079,61**	9079,7**
A x U	1	17,4494 **	0,4253 ^{ns}	0,4253 ^{ns}
Resíduo	16			
Coeficiente de variação		10,95	31,31	6,99

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5% pelo teste F.

O teste de média para o efeito isolado da acústica e da umidade na perda de massa e no rendimento gravimétrico apresentado na Tabela 7. Em que as maiores perdas de massa ocorreram para teores de umidade de 12% com valores 91,8% superiores à umidade de 0%, justificado pela maior quantidade de água na madeira. Modes (2010) encontrou 11,7% de perda de massa para madeira de *Eucalyptus grandis* submetida à torrefação a 160°C. A redução da massa da madeira no processo de torrefação, a partir de 0% de umidade ocorrem devido à degradação térmica de seus constituintes químicos, principalmente as hemiceluloses. Rowell et al. (2005), molécula caracterizada por ter baixo peso molecular, serem amorfas, ramificadas e muito sensíveis à ação de altas temperaturas.

O rendimento gravimétrico foi 15,03% maior para as madeiras torrificadas a 0% de umidade em comparação àquelas com teores de umidade de 12%. A diminuição do rendimento gravimétrico com o aumento da umidade está associada à maior perda de massa, como visto anteriormente. Resultados análogos foram encontrados para a carbonização onde, segundo Arruda et al. (2011) o aumento do conteúdo de água promove incrementos na produção de gases, aumento dos tempos de ignição e diminuição do rendimento gravimétrico.

Pereira et al. (2016) trabalhando com cavacos de eucalipto a 0% de umidade e submetidos a torrefação a 250°C encontraram rendimento de 88,19% e Rodrigues & Rousset (2009) trabalhando com madeira de *Eucalyptus grandis* nas mesmas condições encontraram rendimento de 88,2%.

Tabela 7. Comparação entre médias das propriedades de perda massa e rendimento gravimétrico de material torreficado de *Eucalyptus grandis*.

Umidade	Perda de massa (%)	Rendimento gravimétrico (%)
0%	12,5464 b	87,4535 a
12%	23,9737 a	76,0262 b

Obs: Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

O teste de média da interação umidade versus acústica, para a tensão máxima está na Tabela 8. Quando analisado o efeito da umidade observou-se que, para a madeira torreficada a 0% sem acústica e com acústica, a resistência mecânica à compressão paralela foi, respectivamente, 38,05% e 21,98% maior comparada à umidade de 12%. Quando analisado o efeito da acústica observou-se que, para a madeira torreficada sem acústica, a 0% e 12% de umidade, a resistência mecânica à compressão paralela foi, respectivamente, 38,53% e 14,14% maior comparada ao ensaio com acústica. O uso da acústica propiciou uma diminuição da tensão máxima e uma diminuição do efeito da umidade na tensão máxima, de 38,05% para 21,98%.

A madeira tratada termicamente tem sua capacidade de adsorção e desorção de água com o meio, reduzida e, assim, o baixo conteúdo de umidade torna a madeira mais resistente a esforços mecânicos, compensando os efeitos atribuídos à perda de massa (Boonstra et al., 2007).

Rodrigues (2009), trabalhando com amostras de 2x4x8cm de dimensão e velocidade de 0,24 mm/min, encontrou tensão máxima na compressão paralela às fibras de 664kgf. cm⁻² em torrefação *Eucalyptus grandis* a 220°C e 466 kgf.cm⁻² a 250°C. Duas possíveis explicações para os maiores valores encontrados nesse estudo são a menor dimensão da amostra (27cm³) e a maior velocidade de carregamento (0,6mm/m). Melo (2010) afirma que menores corpos de provas utilizando maiores velocidades alcançam maiores resistências em comparação a maiores corpos de provas utilizando menores velocidades.

Tabela 8. Comparação entre médias da Tensão Máxima na compressão paralela às fibras que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade no processo de torrefação de *Eucalyptus grandis*.

Acústica	Umidade (%)	
	0	12
Sem	1211,51(84,00) aA	874,54 (65,90) aB
Com	818,31(55,19) bA	716,93(73,04) bB

Obs: Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Os valores entre parênteses correspondem a desvio padrão.

Os valores de “F” para densidade aparente e densidade energética para madeira de *Eucalyptus grandis* torreficado se encontra na Tabela 9, quando se analisam as variáveis acústica e umidade. O efeito da interação e das variáveis isoladamente foi significativo para densidade aparente, enquanto para densidade energética apenas o efeito da acústica foi significativo.

Tabela 9. Valores de “F” para densidade aparente e densidade energética para madeira torreficada de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	Grau de liberdade	Densidade aparente (Kg/m ³)	Densidade energética (Mcal/kg)
Acústica (A)	1	52,6948**	7,813**
Umidade (U)	1	49,8371**	0,560 ^{ns}
A x U	1	13,7194 **	3,177 ^{ns}
Resíduo	16		
Coeficiente de variação		6,66	3,22

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5% pelo teste F.

O teste de média para o efeito da torrefação e da acústica na densidade energética está na Tabela 10. Observou-se que a madeira torreficada com acústica possui densidade energética, estatisticamente igual à madeira torreficada sem acústica, mas difere da madeira sem torrefação. Isto indica que a acústica foi importante para melhoria da densidade energética do material torreficado, podendo o seu uso ter melhorado a transferência de calor entre a amostra e o meio. Em madeira torrefeita de *E.grandis* a 250°C Rodrigues (2009) encontrou 4.240 Mcal.kg⁻¹. A Figura 13 ilustra o comportamento da madeira frente a ação do calor.

Tabela 10. Comparação entre médias das propriedades de densidade energética de material torreficado de *Eucalyptus grandis*.

Madeira	Densidade energética (Mcal.kg ⁻¹)
Não torreficada	3.350,20 b
Torreficada sem acústica	3.431,30 ab
Torreficada com acústica	3.507,20 a

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

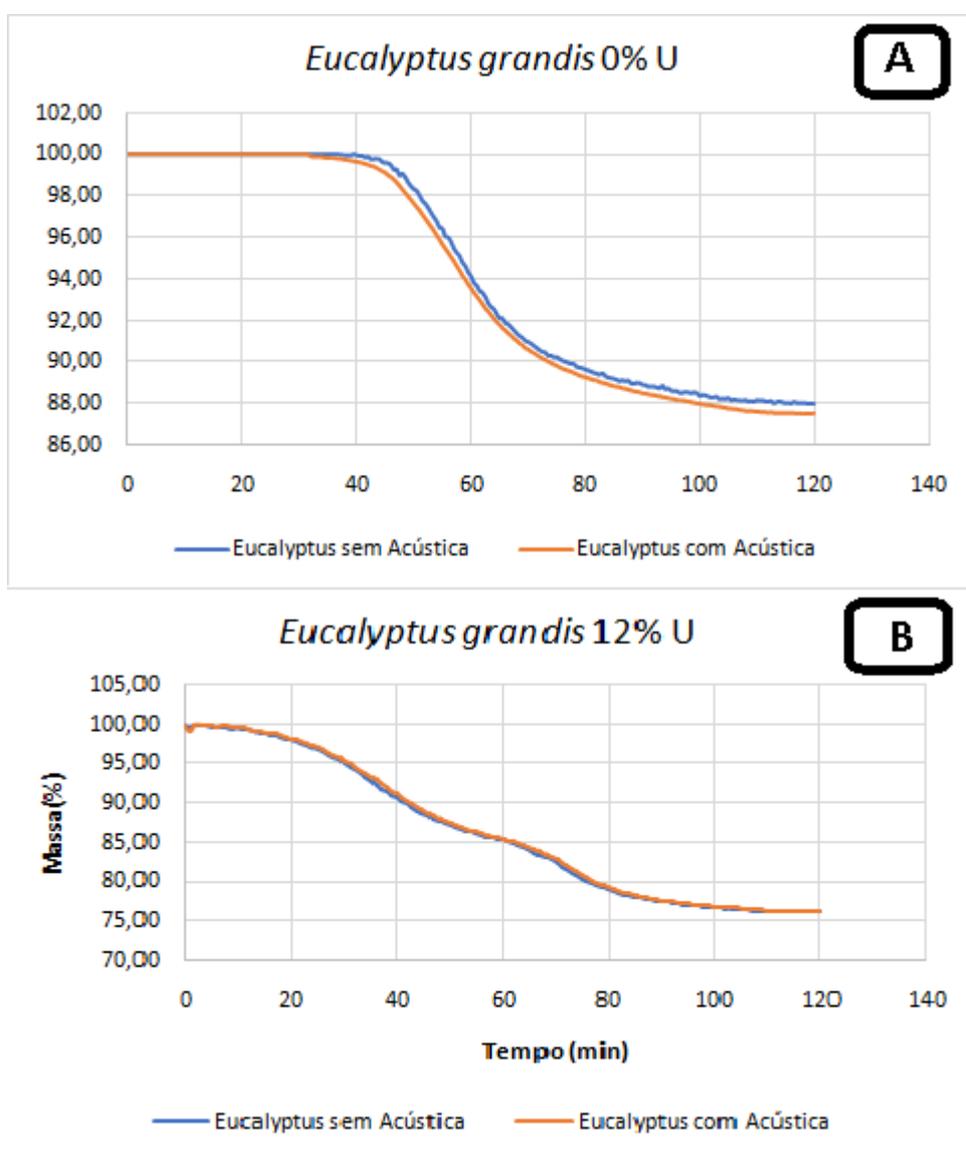


Figura 13. Perfil de degradação térmica de *E. grandis* com umidade de 0 (A) e 12% (B) com presença e ausência de acústica.

A madeira sem tratamento térmico apresentou maior densidade (Tabela 11), uma vez que não sofreu processo de degradação térmica. A madeira com tratamento térmico a 12% de umidade, independente de sua condição, apresentou maior densidade aparente em relação à condição de 0% de umidade. Isto ocorre devido ao acréscimo da quantidade de água higroscópica, o que eleva a massa em uma razão maior que o aumento do volume. Para madeira torrefeita de *E.grandis* a 250°C Rodrigues (2009) encontrou valor médio de densidade aparente de 790 kg.m⁻³.

Tabela 11. Comparação entre médias das propriedades de densidade aparente que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade no processo de torrefação de *Eucalyptus grandis*.

Madeira	Umidade (%)	
	0	12
Não torrificada	745,8 (16,57) aB	845,8 (15,28) aA
Torrificada sem acústica	705,4 (21,71) bA	727,8 (19,31) bA
Torrificada com acústica	713,2 (16,93) bA	737,2 (14,61) b A

Obs: Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Os valores entre parênteses correspondem a desvio padrão.

6.3. EFEITO DA ACÚSTICA DA UMIDADE NA TORREFAÇÃO DE *Pinus elliottii*

Os resultados obtidos através das análises realizadas com as amostras torrificadas permitiram avaliar o efeito da acústica. Observou-se pelos dados da Tabela 12, que não houve interação significativa entre os fatores: acústica x umidade, para nenhum dos parâmetros avaliados, mas quando analisados os fatores isoladamente, observou-se que houve diferença significativa do fator umidade para todos os parâmetros.

Tabela 12. Resumo da análise de variância para análise imediata de material torreficado de *Pinus elliottii*.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Acústica (A)	1	0,7952 ^{ns}	3,3330 ^{ns}	0,7598 ^{ns}
Umidade (U)	1	14,8652**	5,7916 *	14,7914**
A x U	1	0,3021 ^{ns}	1,8850 ^{ns}	0,3277 ^{ns}
Resíduo	16			
Coeficiente de variação		4,74	25,98	12,01

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5%

pelo teste F.

Desta forma, o teste de média para os três parâmetros analisados e considerando os dois tratamentos de umidade: 0% e 12% diposto na Tabela 13. O tratamento a 12% apresentou os maiores valores de carbono fixo (30,57%) e cinzas (0,19) e o tratamento 0% apresenta maiores valores para material volátil (73,9%). Para madeira de *Pinus sp* torreficada a 250°C, Chen et al. (2016), encontraram teor de carbono fixo de 22,32% , cinzas de 0,61 e material volátil de 77,44% e quando torreficada a 280°C observaram teor de material volátil de 72,43% e carbono fixo de 29,26% próximos ao encontrado na presença de 12% de umidade neste trabalho. Carmona et al. (2017) trabalhando com *Pinus patula* torreficada a 250°C encontraram teor de cinzas a 0,28 %.

Como era de se esperar houve uma relação inversa entre teor de carbono fixo e teor de material volátil, pois a determinação foi por diferença. Quanto a cinzas a possível explicação para o maior teor a 12% de umidade foi a maior perda de massa conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Comparação entre médias dos teores de carbono fixo e material volátil e cinzas de madeira torreficada de *Pinus elliottii*.

Umidade	Material Volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
0%	73,9 a	25,94 b	0,15 b
12%	69,24 b	30,57 a	0,19 a

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05).

A tensão máxima determinada através da compressão paralela às fibras, o rendimento gravimétrico e a perda de massa do material torreficado de *Pinus Elliotti*, não apresentaram interação significativa entre os fatores, havendo diferença significativa apenas quando se analise a umidade isoladamente (Tabela 14).

A tensão máxima na compressão paralela às fibras e o rendimento gravimétrico foram maiores para madeira torrificada a 0% de umidade, que pode ser explicado pela menor perda de massa a este teor de umidade, conforme Tabela 15. Péres et al. (2015) encontraram rendimento gravimétrico 84% para *Pinus radiata*, enquanto Carmona et al. (2017) encontraram 93,94% para *Pinus patula* torreficado a 250°C e Melkior et al. (2017) trabalhando com madeira do gênero *Pinus* torreficado a 245°C e 270°C obtiveram 11,4% e

20,9% em perda de massa, respectivamente.

Tabela 14. Resumo das análises de variância para características físico-mecânicas de *Pinus elliottii*.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Tensão Máxima (kgf/cm ³)	Perda de massa (%)	Rendimento gravimétrico (%)
Acústica (A)	1	2.0965 ^{ns}	2.8627 ns	2.8627 ns
Umidade (U)	1	6.5329 *	184.1099 **	184.1099 **
A x U	1	2.3893 ^{ns}	1.1337 ns	1.1337 ns
Resíduo	16			
Coeficiente de variação		19,76	32,53	8,60

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5% pelo teste F.

Tabela 15. Comparação entre médias das propriedades de perda massa e rendimento gravimétrico e Tensão Máxima de material torreficado de *Pinus elliottii*.

Variáveis	Perda de massa (%)	Rendimento Gravimétrico (%)	Tensão Máxima (kgf/cm ³)
Umidade 0%	14,45 b	86,55 a	481,17 a
Umidade 12%	27,36 a	72,63 b	395,96 b

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05).

Não houve interação significativa entre os fatores umidade e acústica quando se analisou a densidade aparente e a densidade básica. Quando analisadas isoladamente, no entanto, a umidade teve influência significativa nos dois parâmetros, enquanto a acústica apenas na densidade aparente (Tabela 16).

Tabela 16. Valores de “F” para densidade aparente e densidade energética de *Pinus elliottii*.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Densidade aparente (Kg/m ³)	Densidade energética (Mcal/kg)
Acústica (A)	1	14.6212 **	0.573 ^{ns}
Umidade (U)	1	15.5023 **	26.228**
A x U	1	2.3833 ^{ns}	0.664 ^{ns}
Resíduo	16		
Coeficiente de variação		10,46	9,01

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5% pelo teste F.

Pelo teste de média da Tabela 17, com inclusão da madeira não torreficada, a densidade aparente apresentou-se significativamente maior para esta, com valor de 530,2 kg.m⁻³ em relação à madeira tratada sem acústica (461,1 kg.m⁻³) e com acústica (463,6 kg.m⁻³) que não diferenciaram significativamente entre si. A Figura 14 ilustra o comportamento da madeira frente a ação do calor. Quanto à influência da umidade, a 0% de umidade a madeira torreficada apresentou maior densidade aparente (508,3 kg.m⁻³). Acompanhando a densidade aparente, a madeira torreficada a 0% de umidade apresentou maior densidade energética.

Almeida & Dias (2016) observou valores de 480 e 540 kg/m⁻³ para densidade aparente da madeira *in natura* de *Pinus elliottii* e *Pinus oocarpa*, respectivamente. Järvinen & Agar (2014) em pellets de pinus torreficados a 255°C encontraram densidade aparente e energética de 633,8 kg.m⁻³ e 3.010 Mcal.kg⁻¹, superiores as encontradas neste estudo por serem materiais densificados.

Tabela 17. Comparação entre médias das propriedades de Densidade aparente e energética de material torreficado de *Pinus elliottii*.

Variáveis		Densidade aparente (Kg/m ³)	Densidade energética (Mcal/kg)
Acústica	In natura	530,2 a	2220,8 a
	Sem	461,1 b	2283,0 a
	Com	463,6 b	2286,2 a
Umidade	0%	508,3 a	2407,2 a
	12%	461,67 b	2119,4 b

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05).

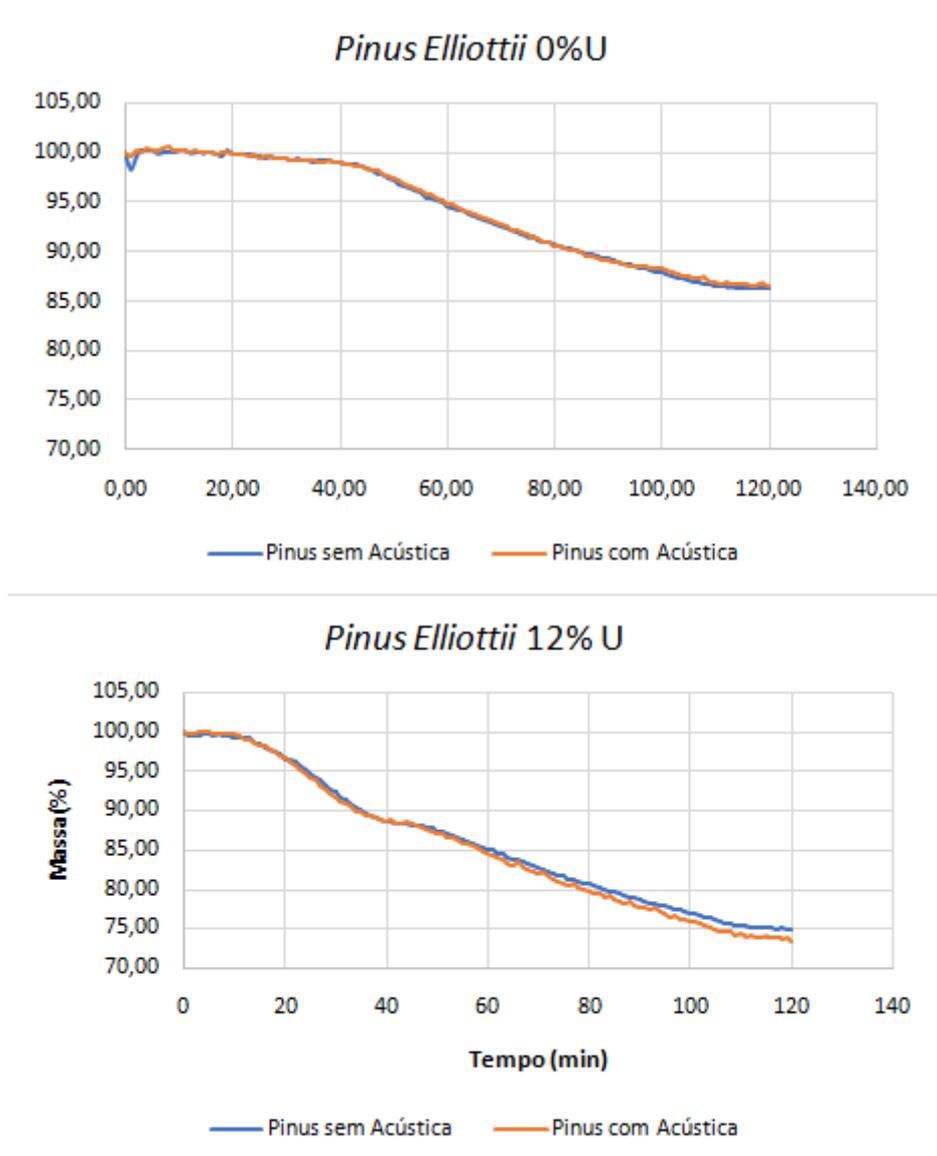


Figura 14. Perfil de degradação térmica de *Pinus Elliottii* com umidade de 0 (A) e 12% (B) com presença e ausência de acústica.

6.4. EFEITO DA ACÚSTICA E DA UMIDADE NA TORREFAÇÃO DE *Dinizia excelsa*

Os resultados obtidos através das análises realizadas com as amostras torrificadas permitem avaliar o efeito da acústica. A interação entre umidade e acústica foi significativa para teor de carbono fixo e isoladamente a umidade influenciou o material volátil e carbono fixo, conforme pode ser observado pela Tabela 18.

Tabela 18. Resumo das análises de variância para análise imediata de material torreficado de *Dinizia excelsa*.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Acústica (A)	1	0,4514 ^{ns}	4,4330 ^{ns}	0,8827 ^{ns}
Umidade (U)	1	15,7641 ^{**}	0,1754 ^{ns}	17,6782 ^{**}
A x U	1	0,0110 ^{ns}	0,8310 ^{ns}	0,0001 [*]
Resíduo	16			
Coeficiente de variação		0,92	19,48	2,16

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5% pelo teste F.

O teste de média para o fator umidade analisado isoladamente considerando o teor de material volátil e teor de cinzas presente na Tabela 19. Observou-se o maior valor de material volátil de 70,44% a 12% de umidade. Para cinzas os valores variaram entre 0,286 e 0,295% não sendo influenciadas pela umidade. Trabalhando com algaroba torreficada a 230 e 270°C, Carneiro Junior (2015) encontrou, respectivamente, material volátil variando entre 84,92 e 72,65% e cinzas entre 2,25 e 2,27%. Para madeira de leucena (*Leucaena leucocephala*) torreficada a 225 e 250°C cuja densidade básica atinge 620 kg.m⁻³, Faruwa & Fuwape (2016) encontraram valores, respectivamente, de teor de material volátil entre 77,09 e 68,44% e de cinza entre 1,57 e 2,33%.

Tabela 19. Comparação entre médias dos teores de material volátil e cinzas para madeira torreficada de *Dinizia excelsa*.

Variáveis	Material Volátil (%)	Cinzas (%)
Umidade 0%	69,54 b	0,286 a
Umidade 12%	70,44 a	0,295 a

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05).

Na Tabela 20 é apresentado o teste de média para a interação entre umidade e acústica para o teor de carbono fixo. O teste de média indica que, independentemente da presença de acústica no processo torrefação, o teor e carbono fixo foisignificativamente maior para os teores de 0% de umidade. Faruwa & Fuwape (2016) trabalhando com madeira de leucena torreficada a 250°C encontraram teor de carbono fixo de 29,22%, enquanto Carneiro Junior

(2015) para madeira de algaroba torrificada a 310°C obteve teor de 32,65% próximos aos encontrados neste estudo.

Tabela 20. Comparação entre médias de carbono fixo (%) que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade no processo de torrefação de *Dinizia excelsa*.

Acústica	Umidade (%)	
	0	12
Sem	30,28 (0,56) aA	29,36 (0,36) aB
Com	30,07 (0,53) aA	29,15 (0,47) aB

Obs: Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

A partir da análise dos valores de “F” apresentado na Tabela 21 observa-se que apenas a umidade influenciou de forma isolada a tensão máxima na compressão paralela às fibras, o rendimento gravimétrico e a perda de massa.

Tabela 21. Resumo das análises de variância para características físico-mecânicas de *Dinizia excelsa*.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Tensão Máxima (kgf/cm ³)	Perda de massa (%)	Rendimento gravimétrico (%)
Acústica (A)	1	0.0094 ^{ns}	1.4085 ^{ns}	1.4085 ^{ns}
Umidade (U)	1	12.1864 ^{**}	3213.3740 ^{**}	3213.4072 ^{**}
A x U	1	0.4448 ^{ns}	0.0571 ^{ns}	0.0571 ^{ns}
Resíduo	16			
Coeficiente de variação		17,88	30,95	6,29

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5% pelo teste F.

A madeira torrificada a 0% de umidade apresentou-se mais resistente com 993,14 kgf.cm⁻³, maior rendimento gravimétrico (88,32%) e a possível explicação é a menor perda de massa (11,68%) apresentada, conforme Tabela 22. Em concordância com dados encontrados, Kim et al. (2015) observaram para cavacos de madeira de acacia e albizia torificados a 250 °C um rendimento gravimétrico e perda de massa variando de 87,08 a 86,72 % e 12,92 a 13,28%, respectivamente.

Tabela 22. Resumo das análises de variância para características físico-mecânicas de *Dinizia excelsa*.

Variáveis	Perda de massa (%)	Rendimento Gravimétrico (%)	Tensão Máxima (kgf/cm ³)
Umidade	0%	11,68 b	88,32 a
	12%	22,11 a	77,89 b
			993,14 a
			785,65 b

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Os valores de “F” apresentados na Tabela 23 para densidade aparente e densidade energética e, com exceção da não significância da umidade na densidade aparente, todos os demais “F” foram significativos.

Os resultados médios das densidades aparentes (kg.m^{-3}) e densidades energéticas (Mcal.kg^{-1}) presentes na Tabela 24 demonstram que madeira sem tratamento térmico dispõe de maiores densidades aparentes. A explicação está na perda de massa devido à degradação parcial, principalmente das hemiceluloses. O melhor tratamento para característica de densidade energética foi sem a presença da acústica com 0% de umidade, apresentado na Figura 15 a qual ilustra o comportamento da madeira frente a ação do calor, expressando pouca separação entre os perfis na presença e ausência de acústica.

Paula (2014) trabalhando com briquete torreficado à 200°C de sabugo de milho, casca de coco e bagaço de cana obteve valores de densidade aparente 969 kg.m^{-3} , 1076 kg.m^{-3} e 832 kg.m^{-3} e com base nos dados de densidade aparente e poder calorífico inferior encontrados por este autor, foi possível determinar a densidades energéticas nos valores de $5.893 \text{ Mcal.kg}^{-1}$, $5688 \text{ Mcal.kg}^{-1}$ e $5.203 \text{ Mcal.kg}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 23. Resumo da análise de variância para característica física e energética de madeira torreficada *Dinizia excelsa*.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Densidade aparente (Kg/m^3)	Densidade energética (Mcal/kg)
Acústica (A)	1	173.7391 **	7.542 *
Umidade (U)	1	1.5337 ns	51.155 **
A x U	1	18.8353 **	6.838 *
Resíduo	16		
Coeficiente de variação		7,13	3,47

** significativo a 1% pelo teste F; *significativo a 5% pelo teste F; ns - não significativo a 5%

pelo teste F.

Tabela 24. Comparação entre médias das propriedades de densidade aparente e energética que apresentaram efeito significativo da interação acústica x umidade no processo de torrefação de *Dinizia excelsa*.

Propriedades	Acústica	Umidade (%)	
		0	12
Densidade aparente (Kg/m ³)	In natura	1043,6 (16,00) aB	1111,8 (28,83) aA
	Sem	955,8 (15,65) bA	942,4 (18,98) bA
	Com	947,6 (17,48) bA	918,6 (13,06) bB
Densidade energética (Mcal/kg)	In natura	4903,46 (75,22) aA	4517,0 (117,16) bB
	Sem	4903,7 (80,33) aA	4810,8 (96,89) aA
	Com	4851,4 (89,5) aA	4632,96 (65,9) bB

Obs: Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

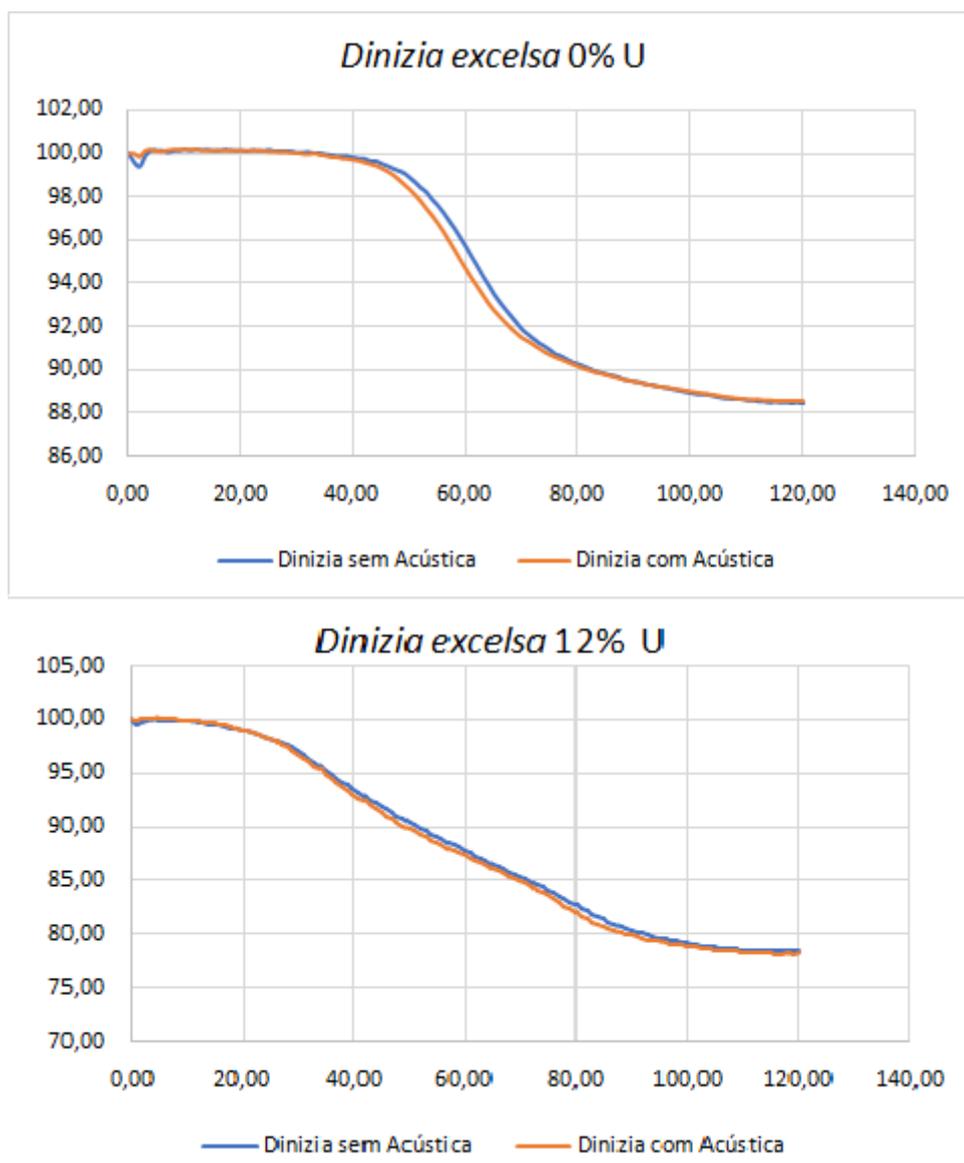


Figura 15. Perfil de degradação térmica de *Dinizia excelsa* com umidade de 0 (A) e 12% (B) na presença e ausência de acústica.

7. CONCLUSÃO

A análise de variância dos resultados indica que a acústica influencia alguns parâmetros de qualidade da madeira torrificada, durante o processo de torrefação quando se analisa espécies de diferentes densidades. Para o *E.grandis* houve aumento da densidade energética e diminuição da resistência mecânica do material torreficado. A madeira torrificada do *Pinus elliotii* não sofreu influência do uso acústico e a para a madeira de *Dinizia excelsa* houve diminuição da densidade energética do material torreficado.

A umidade da madeira durante o processo de torrefação também influencia a qualidade da madeira torreficada, dependendo da espécie. Para a madeira torreficada de *E. grandis* e *Pinus elliottii* houve aumento do teor de carbono fixo, diminuição do teor de materiais voláteis e da resistência mecânica. Para a madeira torreficada de *Dinizia excelsa* a resistência mecânica e o teor de carbono fixo diminuíram e o teor de materiais voláteis aumentou.

Os gráficos de perda de massa mostram claramente uma menor quantidade de energia para corpos de prova torreficados com umidade inicial de 12%. A acústica é uma boa condutora de calor.

Os resultados indicam que o efeito da acústica na qualidade da madeira torreficada foi diferenciado, quando se considera espécie de baixa, média e alta densidade básica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; SHIMIZU, J. Y. Cultivo de Pinus. Sistemas de Produção: Embrapa Florestas -2ª edição, v. 5, p.15-25, maio 2011.

ALMEIDA, D. H. DE.; DIAS, A. A. Comparação de métodos de ensaio para determinação da resistência da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras. **Rev. Árvore**, vol.40. 2016.

ANDRADE, C. R. **Espectroscopia no infravermelho próximo para predizer propriedades da madeira e do carvão vegetal de plantio clonal de Eucalyptus sp.** 2009. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

ARANGO, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de Eucalyptus grandis, E. saligna e E. grandis x urophilla.** 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ARAÚJO, S.O.; VITAL, B.R.; MENDOZA, Z.M.S.H.; VIEIRA, T.A.; CARNEIRO, A.C.O. Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* SP. Scientia Forestalis,

Piracicaba, v. 40, n.95, p. 327-336, 2012.

ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 949-955, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS (ABM). Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008. Nota técnica TR 04a: Biomassa da Madeira para siderurgia. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 18 p, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9165/85. Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. São Paulo, SP, Brasil: Associação brasileira de normas técnicas. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8112/86. Carvão vegetal – Análise imediata. São Paulo, SP, Brasil: Associação brasileira de normas técnicas. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8633/84. Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. São Paulo, SP, Brasil: Associação brasileira de normas técnicas. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). Anuário estatístico 2012: ano base 2011. Brasília, DF: ABRAF, 2012. 150 p.

ASTM. 2000. Standard Test Methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken. D143.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O.; MIGLIORINI, A.J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. In: *Silvicultura. Anais do 4º Congresso Florestal Brasileiro*. São Paulo/SP, 8(28):726-731, fev., 1983.

BENNETT, G., MAHON, J., MURRAY, D., PERSONS, T., & DAVIS, I. (2009). Heat Transfer Enhancement In Ducts Due To Acoustic Excitation. Fluid Mechanics and Thermodynamics (ExHFT- 7)

BERGMAN, P.C.A. ; A.R. BOERSMA; J.H.A. Kiel; M.J. PRINS; K.J. PTASINSKI; F.J.J.G. Janssen. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. Petten, Netherlands: ECN, 2005. 51p. Netherlands.

BISTAFA, S. R. Acústica aplicada ao controle do ruído. São Paulo.E.Bluncher, 2006.389 p.

BOONSTRA, M. J. et al. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 64, n. 7, p. 679-690, 2007.

BORGES, A. C. P.; ALVES, C. T.; TORRES,E. A. Torrefied Eucalyptus Grandis Characterization as a Biomass to Using in Industrial Scale. **Chemical Engineering Transactions**, v 49, p. 283-288.2016.

BOTREL, M.C.G.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; MOREIRA DE SILVA, J.R. Seleção de clones de Eucalyptus para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Forestalis**, v.38, n.86, p.237-245, 2010.

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

BRAND, M. A. Fontes de biomassa para a geração de energia: notas de aula. Uniplac e Udesc, 2008.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MIGLIORINI, A. J.; MURAMOTO, M. C.Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. Boletim informativo IPEF, Piracicaba, SP, n. 23, p. 53-56, 1983.

BRITO, J. O.; SILVA JR. F. G. Fundamentos e Aplicações da Química da Madeira:

Apontamentos de aula 1. Esalq/USP; Piracicaba, SP. 2005.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. L.; CARNEIRO, A. de. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, B. L. C.; DONATO, D. B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**. V.44, n.112, p. 831-840. 2016.

CARMONA, S.R.; PÉREZ, J.F.; SAMANIEGO, M.R.P.; BARRERA, R.; PEREZ, M.G. *Effect of torrefaction temperature on properties of patula pine*. **Maderas. Ciencia y tecnología**, V. 19, p. 39 - 50, 2017.

CARNEIRO JUNIOR, J. A. DE. M.; **Desenvolvimento experimental de um reator em batelada para torrefação de biomassa**. 73 f Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, 2015.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha**. 2000. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2000.

CASTRO, J. P.; PERÍGOLO, D. M.; BIANCHI, M. L.; MORIL, F. A.; FONSECA, A. S.; ALVES, I. C. N.. VASCONCELOS, F. J. Uso de espécies amazônicas para envelhecimento de bebidas destiladas: análises física e química da madeira. **Cerne** , v. 21, p. 319-327, 2015.

CHEN, W.-H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 847–866, 2015.

CHEN, Y.; CAO, W.; ATREYA, A. *An experimental study to investigate the effect of torrefaction temperature and time on pyrolysis of centimeter-scale pine wood particles*. **Fuel Processing Technology** , V.153, p. 74–80, 2016.

CORTEZ, C. L.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G., COELHO, S. T.; MOREIRA, J. R.; AMENDOLA, F. C. B.; GAVIOLI, F. Análise do processo produtivo do eucalipto no sistema “short rotation” para o uso como combustível em uma usina termoelétrica. In, Congresso Internacional de Bionergia, 4, 2009, Curitiba, Anais. São Paulo: Centro Nacional de Referência em Biomassa, 7 p.

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

CUNHA, M. P. S. C. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. Anais... São Carlos: UFSCar, 1989. v. 2, p. 93-121.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYOMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p.

EGAN, M. D. **Architectural Acoustics**. Ed. MCGRAW-HILL: New York – EUA, 1988.

ELOY, E.; DA SILVA, D. A.; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R.; CARON, B. O.; ELI, E. F. Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill EX Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v.40, n.4, p.749-758, 2016.

EMBRAPA. **Manual de identificação botânica e anatômica - angelim**. Belém, Pará. 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA (EMBRAPA). Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais: Um guia para ações municipais e ambientais. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR. 2000. 351 p.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2017. 292 p.

FAO. El eucalipto en la repoblación forestal. Roma, 1981. 747p.

FARUWA, F. A.; FUWAPE, J.A.; *Combustion characteristics of torrefied wood samples of pinus carrebea and leucaena leucocephala grown in Nigeria*, **Pro Ligno**, v.12, n.4, p.21-29, 2016.

FELFLI, F.F.; LUENGO, C.A.; SOLER, P.B. Torrefação da biomassa: características, aplicações e perspectivas. In: ENCONTRO SOBRE ENERGIA MEIO RURAL, 3., 2000, Cidade. Anais.

FERNANDES, G. F. S. Decisões silviculturais com base na densidade. 2013. 28f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2013.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

FRIEDL, A. et al. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*, Amsterdam, v. 544, n. 1/2, p. 191-198, Feb. 2005.

GILMAN, E. F.; WATSON, D. G. *Pinus elliottii*: Fact Sheet ST-463. [Gainesville]: United States Forest Service-Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Oct. 1994. 4 p.

GIRARD, P., N. SHAH, Recent developments on torrefied wood, an alternative to charcoal for reducing deforestation, *REUR Tech. Ser.* 20 (1991) 101–114.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte, MG: CETEC, 1980. p 27 - 41.

GONÇALEZ, J.C.; BREDAS, L.C.S.; BARROS J.F.M.; MACEDO D.G.; JANIN, G.;

COSTA, A.F.; VALE, A.T. Características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *E. Cloeziana* F.Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341, dez. 2006.

GOULART, M.; HASELEIN, C.R.; HOPPE, J.M.; FARIAS, J.A.; PAULESKI, D.T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, v.13, p.167-175, 2003.

GRASSMANN, G. da.S .; ANDRADE, C.R.; DIAS JUNIOR, A.F.; SILVA JUNIOR, G. da.; BRITO, J.O.; Timber wastes torrefaction for energy use. **maderas. Ciencia y tecnologia**, v.18, p.105 - 112, 2016.

HASELEIN, C. R.; CALEGARI, L.; BARROS, M. V.; HACK, C.; HILLIG, E.; PAULESKI, D. T.; POZZERA, F. Resistência mecânica e à umidade de painéis aglomerados com partículas de madeira de diferentes dimensões. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 127-134, dez. 2002.

HILL, S.J.; GRIGSBY, W. J.; HALL, P. W. N. *Chemical and cellulose crystallite changes in Pinus radiata during torrefaction*. **Biomass and bioenergy**, v.56, p.92-98, 2013.

HILLIG, E.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Propriedades mecânicas de chapas de aglomerados estruturais fabricados com madeiras de Pinus, Eucalipto e Acácia Negra. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 59-70, jun. 2002.

IBÁ-INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ARVORE 2017. Brasília, DF: IBÁ, 2017.80 p.

IBDF (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal). **Potencial Madeireiro do Grande Carajás**. Brasília, 134 p. 1983.

JÄRVINEN, T.; AGAR, D. *Experimentally determined storage and handling properties of fuel pellets made from torrefied whole-tree pine chips, logging residues and beech stem wood*. **Fuel**, V.129, P. 330–339.2014.

KIM, Y. H.; NA, B. II.; AHN, B.J.; LEE, H.W.; LEE, J.W. *Optimal condition of torrefaction for high energy density solid fuel of fast growing tree species*. **Korean J. Chem. Eng.** V. 32, p. 1547-1553, 2015.

KLOCK, U. et al. *Química da madeira*. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2005. 86 p.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E.; STAM, A.J. *Principles of wood science and technology*. Berlin: Springer-Verlag, 1975. v. 2. 703 p.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. *A Cultura do Pinus no Brasil*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.

KUMAR, R.; PANDEY, K.K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.35, n.3, p. 1339-1344. 2011.

LACAVA, P.T.; FERREIRA, D.S.; PIRES, A.C.; Efeito da frequência e da amplitude de oscilação no formato de chamas pré-misturadas pulsadas. In: Congresso brasileiro de engenharia mecânica, 1999, Águas de Lindóia, SP.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das Gimnospermas**. Santa Maria: Ed. da Universidade Federal de Santa Maria. p. 158, 1996.

MELKIOR, T.; BARTHOMEUF, C.; BARDET, M. *Inputs of solid-state NMR to evaluate and compare thermal reactivity of pine and beech woods under torrefaction conditions and modified atmosphere*. **Fuel**, v.187, p. 250–260, 2017.

MELO, J. E. **Influência das dimensões de corpos-de-prova e da velocidade de ensaio na caracterização de três espécies de madeiras tropicais**. 134 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)- Departamento de Ciências Florestais, Universidade de Brasília (Unb), Brasília, 2010.

MENEZES, F.L.O. **A acústica musical em palavras e sons**. São Paulo. Ateliê editorial. 2003.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>>. Acesso em: 11 Junh. 2016.

MODES. K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)- Departamento de Ciências Florestais, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MORAIS, S. A. L. de, NASCIMENTO, E. A. do, MELO, D. C. de. Análise da madeira *Pinus oocarpa* parte 1 – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**. v. 29, n. 3, p. 461-470, 2004.

MOREIRA, A. P.; SILVEIRA, E.DA.; ALMEIDA, D. H. DE.; ALMEIDA, T. H. DE.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO, F. A. *Toughness and Impact Strength in Dynamic Bending of Wood as a Function of the Modulus of Elasticity and the Strength in Compression to the Grain*. **International Journal of Materials Engineering**, v.7, p. 61-67, 2017.

MOREIRA, J. M. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Brazilian Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 68. 2011.

NASCIMENTO, C.C. GARCIA, J.N.; DIÁZ, M.P. Agrupamento de espécies madeireiras da Amazônia em função da densidade básica e propriedades mecânicas. **Madera y Bosques** 3(1), 1997.

NEPOMUCENO, L. X. **Acústica**. Edgard Blucher, São Paulo; 1977.

NETTO, G. B. F.; OLIVEIRA, A. G. DE. P.; COUTINHO, H. W. M.; NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização energética de biomassas amazônicas, **An. 6. Enc. Energ. Meio Rural**. 2006.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T de P.; TRUGILHO, P. T.; VALLE, M. L. A.; DE SOUSA, L. C.; VIEIRA, C. M. M.. Qualidade da madeira de clones de Eucalyptus em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B.L.C.; CARDOSO, M.T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, Belo Horizonte, p.62-102. 1982.

OLIVEIRA, T. K.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; BOTELHO, A. S.; HIGASHIKAWA, E. M.; MAGALHÃES, W. M. Radiação solar no sub-bosque de sistema agrossilvipastoril com eucalipto em diferentes arranjos estruturais. **Cerne**, Lavras, v.13, n.1, p.40-50, 2007.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo, 1997, 429p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PAULA, L.E. de R. **Efeito da torrefação e briquetagem nas propriedades energéticas de resíduos agroindustriais**. Lavras, 2014, 88p. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. de O.; CARVALHO, A. M. M. J.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, Railegh, v. 8, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PEREIRA, M. P. de. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. de. C. O.; OLIVEIRA, A. C. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 36, n. 87, p. 269-275. 2016.

PÉREZ, A.L.E.; SEGURA, C.; ESPINOZA, D.; RADOVIC, L.R.; JIMENEZ, R. *Torrefaction of Pinus radiata and Eucalyptus globulus: A combined experimental and modeling approach to process synthesis*. **Energy for Sustainable Development** .N.29, p.13–23. 2015.

PINCELLI, A.L.P.S.M. **Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos, ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética**. 2011. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa: Recursos Florestais – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura —Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2011.

PINHEIRO, P. C. C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão de Eucalyptus. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2, p. 159-168, 2005.

PINTO, F.; GOMINHO, J.; ANDRE, R.N.; GONÇALVES, D.; MIRANDA, M.; VARELA, F.; NEVES, D.; SANTOS, J.; LOURENÇO, A.; PEREIRA, H. *Improvement of gasification performance of Eucalyptus globulus stumps with torrefaction and densification pre-treatments*. **Fuel**, n.206, p.289-299, 2017.

PRINS, M. J. **Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction**. Tese de Doutorado, Department of Chemical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven. 2005. 164 p.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G. Torrefaction of wood Part 1. Weight loss kinetics. In: *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 77, 2006, p 28 – 34.

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

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. Do.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

RIBEIRO, A.G.; LACAVA, P.T.; Utilização de micro termopares para identificar e caracterizar oscilações em chamas. In: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2002, São José dos campos-SP.

RODRIGUES, T. O. & ROUSSET, P. L. Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* Wood. **Cerne**, v. 15, n. 4, p. 446-452, 2009.

RODRIGUES, T.O., **Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos**. 2009. 82f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Florestal. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROUSSET, P.; FERNANDES, K.; VALE, A.; MACEDO, L.; BENOIST, A. Change in particle size distribution of Torrefied biomass during cold fluidization. **Energy**, Oxford, v. 51, p. 71-77, 2013.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Cell Wall Chemistry. In: Handbook of wood chemistry and wood composites. Rowell, R. M. (ed.) Boca Raton, Florida: CRC, 2005. p 35 – 74.

SANTOS, J. R. S. dos. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 2012. 85 f. Dissertação (mestrado em Ciências)- Escola superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’ –ESALQ, Piracicaba.2012.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). Florestas do Brasil em resumo - 2013: dados de 2007-2012. / Serviço Florestal Brasileiro. – Brasília: SFB, 2013. 188 p.

SILVA, A. G. Condicionamento de resíduo de *Eucalyptus grandis* para produção de biocombustível sólido. 2013. 130 f. Tese de doutorado - Universidade Federal da Bahia, Salvador. BA.

SILVA, C. M. S. Efeito da temperatura de torrefação nas propriedades energéticas da madeira de eucalipto. 2014. 41 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOARES, V. C.; BIANCHI, P. F.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

SOUZA, M. M.; SILVA, D. A.; Rochadelli, Roberto; SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta (Online)** (Curitiba), v. 42, p. 325-334, 2012.

SOUZA, M.H.; MAGLIANO, M.M.; CAMARGOS, J.A.A. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. IBAMA/Laboratório de Produtos. Florestais, Brasília. 152p. 1997.

VIEIRA, A.C.; SOUZA, S.N.M.; BARICCATTI, R.A.; SIQUEIRA, J.A.C.; NOGUEIRA, C.E.C. Caracterização da casca de arroz para geração de energia. **Revista Varia Scientia**

Agrárias, v. 3, n. 1, p. 51-57, 2013.

VITAL, B. R. et al. Efeito da idade da árvore na densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* cultivada na região do cerrado de Minas Gerais. Brasília: IBDF, 1984. p. 41-52.

WERTHER, J., SAENGERA M., HARTGEA E. U., OGADA T., SIAGIB Z. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 26, p. 1-27, 2000.

ZANZI, R.; D. FERRO T.; TORRES, A.; SOLER, P. B.; BJÖRNBOM, E. BIOMASS TORREFACTION. In: 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Roma, Itália, 2004.4p.

ZHOU D.W, LIU D.Y, X.G HU, C.F MA. Effect of acoustic cavitation on boiling heat transfer. ***Experimental Thermal and Fluid Science***, v. 26, p. 931–938, 2002.

ZINN, B.T., 1986, Pulsating combustion. In: *Advanced Combustion Methods*, ed. F.J. Weinberg, Academic Press, pp. 113-181.