



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

THAÍS MENDES BRITO

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA
JUVENIL DE *Eucalyptus grandis* W. Hill E *Tectona grandis* L. f.**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2017

THAÍS MENDES BRITO

EFEITO DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA
JUVENIL DE *Eucalyptus grandis* W. Hill E *Tectona grandis* L. f.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais. Orientador: Prof. Dr. **Djeison Cesar Batista**. Coorientadores: Prof. Dr. **Juarez Benigno Paes** e Prof. Dr. **Humberto Fantuzzi Neto**.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

B862e Brito, Thaís Mendes, 1989-
Efeito da modificação térmica nas propriedades da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* W. Hill e *Tectona grandis* L.f / Thaís Mendes Brito. – 2017.
75 f. : il.

Orientador: Djeison Cesar Batista.
Coorientador: Juarez Benigno Paes ; Humberto Fantuzzi Neto.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Madeira - Pesquisa. 2. Reflorestamento. 3. *Eucalyptus grandis*. I. Batista, Djeison Cesar. II. Paes, Juarez Benigno. III. Fantuzzi Neto, Humberto. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

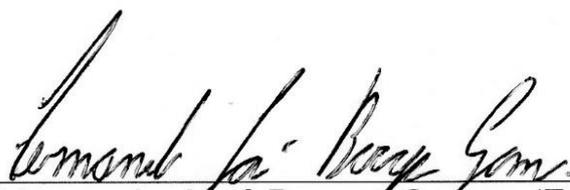
CDU: 630

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA
JUVENIL DE *Eucalyptus grandis* W.Hill E *Tectona grandis* L.**

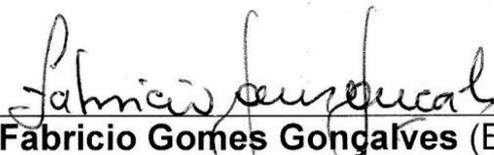
Thaís Mendes Brito

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 25 de Julho de 2017.



Prof. Dr. Fernando José Borges Gomes (Examinador externo)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Djeison Cesar Batista (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

*“O próprio Senhor irá à sua frente e estará com você;
ele nunca o deixará, nunca o abandonará.
Não tenha medo! Não desanime!”*

Deuteronômio 31:8

DEDICATÓRIA

Aos meus preciosos pais, Aurenice Mendes Brito e Leonelson Alves Brito, que não medem esforços para a realização dos meus sonhos; ao meu irmão, Gustavo Mendes Brito; e ao meu noivo Murilo Leite Oliveira, por todo amor, compreensão e apoio nessa jornada. Serei eternamente grata a vocês por dividirem comigo as dores e os amores desta vida.

Carinhosamente dedico!

AGRADECIMENTOS

A Deus, que em todos os momentos me fez sentir a sua presença. Por sua infinita bondade, amor e misericórdia, por ser minha luz e amparo, por me conceder forças para nunca desistir e seguir acreditando nos meus sonhos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

À empresa *TWBrazil* (Ponta Grossa, Paraná), pela doação da madeira deste estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor e orientador D.Sc. Djeison Cesar Batista, por todo conhecimento compartilhado, pela dedicação e paciência, me ajudando na árdua tarefa de crescer, prosperar e vencer na área da pesquisa acadêmica.

Aos coorientadores, pela contribuição nesta pesquisa, pelos conhecimentos transmitidos. Agradeço em especial ao Professor D.Sc. Juarez Benigno Paes, pela paciência, ensinamentos, disponibilidade e, principalmente, amizade.

Aos demais professores que me aconselharam e contribuíram para minha formação acadêmica e realização deste trabalho: D.Sc. Adriano Ribeiro Mendonça, D.Sc. Fabrício Gomes Gonçalves, D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre, D.Sc. José Tarcísio da Silva Oliveira e D.Sc. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.

Aos técnicos de Laboratório Elecy Palácio Constantino, Gilson Barbosa São Teago e José Geraldo Oliveira, pelo auxílio na condução dos experimentos e amizade; e às servidoras do departamento, Elizângela Pereira Cunha de Almeida e Valquíria Amorim Zampirolli.

Às alunas de graduação em Engenharia Industrial Madeireira da UFES que me ajudaram na execução dos experimentos: Mariana Aya Suuchi, Raysieli Barbosa Teixeira e Sabrina Daré Alves. À aluna do Curso Técnico em Agropecuária da Escola Família Agrícola de Cachoeiro de Itapemirim, Laimara Lima Ângelo.

Aos meus familiares, por serem minha fortaleza em todos os momentos, por me ensinarem o verdadeiro valor da vida e por me amarem incondicionalmente.

À minha segunda família, nas pessoas de Aldei Souza Leite Oliveira, Edson Alves de Oliveira, em especial ao meu noivo, Murilo Leite Oliveira, por incentivar e apoiar as minhas escolhas.

Aos colegas de linha de pesquisa e amigos de laboratório, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e pelos bons momentos de convivência: Alice Soares Brito, Amanda Mota Nunes, Ana Carolina Bôa, Ana Paula Câmara da Silva, André Prata Villas-Boas Maciel, Bárbara Mendes Oliveira, Brunella Pollastrelli Rodrigues, Dercílio Junior Verly Lopes, Glaucileide Ferreira, Izabella Luzia Silva Chaves, João Gabriel Missia da Silva, Luciana Ferreira da Silva, Márcia Fernanda Carneiro, Marcos Alves Nicácio, Pedro Nicó de Medeiros Neto, Raghnya Sharon Ferreira Martins, Sabrina Barros Santiago, Sara Freitas de Sousa e Victor Fassina Brocco.

Aos amigos que conquistei, em especial à Catherine Cristina Claros Leite, Joyce de Almeida, Laís Gonçalves da Costa, Marciana Christo Berude, Sandra Aguiar de Oliveira Pires, Taís Rizzo Moreira, Timóteo Paladino do Nascimento e Vítor de Souza Abreu. Vocês fizeram toda diferença nesta fase da minha vida e se tornaram muito especiais. Agradeço a Deus pela vida de cada um e espero reencontrá-los algum dia.

Muito obrigada!

BIOGRAFIA

Thaís Mendes Brito, filha de Aurenice Mendes Brito e Leonelson Alves Brito, nasceu na cidade de Nanuque, estado de Minas Gerais, aos 28 dias de dezembro de 1989.

Estudou no Centro Educacional Leon Feffer desde o maternal até o ensino médio, na cidade de Itabatã, BA.

Em 2009, ingressou no curso de Licenciatura em Ciências Biológicas da Universidade do Estado da Bahia – UNEB, na cidade de Teixeira de Freitas, BA, concluindo a graduação em 2014.

Em julho de 2014 matriculou-se no curso de Especialização no Ensino de Biologia e Química pela Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, na cidade de Petrolina, PE, concluindo o curso em 2015.

Em agosto de 2015 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, desenvolvendo seu trabalho na linha pesquisa de Tecnologia de Produtos Florestais, obtendo o título de mestra em Ciências Florestais em julho de 2017.

RESUMO

BRITO, Thaís Mendes. **Efeito da modificação térmica nas propriedades da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* W. Hill e *Tectona grandis* L. f.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: D.Sc. Djeison Cesar Batista. Coorientadores: D.Sc. Juarez Benigno Paes e D.Sc. Humberto Fantuzzi Neto.

O processo de modificação térmica apresenta-se como uma alternativa viável para a melhoria de algumas propriedades da madeira. Nesse contexto, há a possibilidade de que esta técnica seja empregada em madeiras oriundas de povoamentos florestais jovens, aumentando-se assim a viabilidade desses empreendimentos. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do processo brasileiro de modificação térmica na composição química, em algumas propriedades físicas e mecânicas, e na resistência à biodeterioração da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*. Quatro tratamentos foram investigados, resultantes da interação entre os fatores espécie e processo. Para atender ao objetivo proposto foram realizadas as seguintes análises: químicas (lignina solúvel e insolúvel, hemiceluloses, extrativos totais e solubilidade em acetona, clorofórmio, diclorometano e etanol-tolueno), físicas (densidade aparente a 12%, higroscopicidade e inchamento total), mecânicas (compressão paralela às fibras e flexão estática) e resistência à biodeterioração por fungos *Postia placenta* e *Trametes versicolor*, térmitas *Nasutitermes corniger* e *Cryptotermes brevis*. Quanto ao efeito do processo de modificação térmica a 160 °C, houve aumento aparente dos teores de lignina total, extrativos totais e em água quente, e melhor solubilidade para os solventes polares (acetona e etanol-tolueno); a higroscopicidade foi reduzida em ambas as espécies, decorrente da perda de massa de hemiceluloses; a resistência mecânica à flexão estática e à compressão paralela às fibras foi reduzida; e aumento na resistência de ambas as espécies à biodeterioração causada por térmitas subterrâneas; o mesmo ocorreu apenas para a madeira de *Eucalyptus grandis* exposta a térmitas de madeira seca. Analisando-se os prós e contras do processo, é mais recomendável a modificação térmica a 160 °C da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* do que da madeira juvenil de *Tectona grandis*.

Palavras-chave: Madeira de reflorestamento, processo brasileiro, modificação higrótérmica.

ABSTRACT

BRITO, Thaís Mendes. **Effect of thermal modification on the properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill and *Tectona grandis* L. f. juvenile wood.** 2017. Dissertation (Masters in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: D.Sc. Djeison Cesar Batista. Co-advisors: D.Sc. Juarez Benigno Paes and D.Sc. Humberto Fantuzzi Neto.

The process of thermal modification presents itself as a viable alternative for an improvement of real estate of the wood. In this context, there is a possibility of technical production in woods from young forest stands, thus increasing the viability of enterprises. The objective of this study was to evaluate the effect of the Brazilian process of thermal modification on the chemical composition, on some physical and mechanical properties, and on the biodeterioration resistance of *Eucalyptus grandis* and *Tectona grandis* juvenile wood. Four treatments were investigated, resulting from the interaction between species and species. In addition, chemical solutions (soluble and insoluble lignin, hemicelluloses, total extractives and solubility in acetone, chloroform, dichloromethane and ethanol: toluene), physical (apparent density at 12%, hygroscopicity and total swelling), mechanical (compression parallel to Fibers and static flexion) and resistance to biodeterioration by fungi *Postia placenta* and *Trametes versicolor*, termites *Nasutitermes corniger* and *Cryptotermes brevis*. Thermal modification process at 160 °C, increase in total consumption, total extractives and hot water, and better solubility for polar solvents (acetone and ethanol: toluene); Hygroscopicity was reduced in both species, due to the loss of mass of hemicelluloses; The mechanical resistance to the static flexion and the compression parallel to the fibers were reduced; And increase in the resistance of the companies like species to the biodeterioration caused by subterranean termites; The same for *Eucalyptus grandis* wood exposed to dry wood termites. Analyzing the pros and cons of the process, it is more advisable to modify thermal at 160 °C of juvenile *Eucalyptus grandis* wood than that of *Tectona grandis* juvenile wood.

Keywords: Reforestation wood, Brazilian process, hygrothermal modification.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill	15
3.2	<i>Tectona grandis</i> L. f.	16
3.3	MADEIRA JUVENIL	17
3.4	PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA.....	18
3.5	PROPRIEDADES DA MADEIRA E EFEITO DO PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA.....	19
3.5.1	Composição química	19
3.5.3	Propriedades físicas	22
3.5.4	Propriedades mecânicas	24
3.5.5	Resistência à biodeterioração	25
4	MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	27
4.2	ANÁLISES QUÍMICAS.....	28
4.3	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS.....	29
4.4	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	30
4.5	ENSAIOS DE BIODETERIORAÇÃO	31
4.5.1	Fungos apodrecedores (podridão parda e branca)	31
4.5.2	Térmitas subterrâneas	33
4.5.3	Ensaio com térmitas de madeira seca	35
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	ANÁLISES QUÍMICAS.....	38
5.2	PROPRIEDADES FÍSICAS	44
5.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS	48
5.4	ENSAIOS DE BIODETERIORAÇÃO	51
5.4.1	Fungos apodrecedores	51
5.4.2	Térmitas subterrâneas	54
5.4.3	Térmitas de madeira seca	56

6 CONCLUSÕES	59
7 REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE	68

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material versátil que acompanha o ser humano desde o início da sua história. Por ser um material sustentável, com boa resistência mecânica e fácil trabalhabilidade, possui diversas utilidades e aplicações e, por isso, tem conquistado considerável espaço e uma demanda cada vez maior no mercado. Mesmo com o passar dos anos e o avanço da tecnologia, o interesse pela utilização da madeira como material não foi reduzido.

É crescente o interesse dos pesquisadores brasileiros em relação às características da madeira juvenil, por causa das mudanças nas práticas de manejo silvicultural, originadas pelas pressões crescentes na demanda por madeira. Assim, para atender ao mercado, os silvicultores têm dado prioridade à produção de madeira com curtas rotações, induzindo o crescimento rápido das árvores, sem considerar, muitas vezes, as propriedades físicas e mecânicas da madeira resultante (BALLARIN; LARA PALMA, 2003).

A proporção de madeira juvenil e madeira adulta influencia diretamente nas propriedades do material, tais como dureza, densidade e estabilidade dimensional. A rapidez do crescimento e as condições edafoclimáticas são alguns dos fatores que favorecem a formação de madeira juvenil (BALLARIN; LARA PALMA, 2003). Em decorrência da influência nos processos de transformação e na qualidade dos produtos derivados, justifica-se o interesse do conhecimento da madeira juvenil (PAES et al., 2015a).

É conhecido que a madeira formada na fase juvenil da árvore possui maior variabilidade nas suas propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas que aquela produzida na fase adulta. Por isso, as propriedades da madeira juvenil são consideradas inferiores às da adulta, principalmente para a utilização em produtos do processamento mecânico secundário, tais como pisos, molduras e portas, por exemplo (GATTO et al., 2008; WIEDENHOEFT; MILLER, 2005).

A madeira juvenil ocorre próxima à medula, proveniente do crescimento inicial, e difere da madeira adulta por possuir menores densidade, conteúdo de celulose e resistência mecânica; maiores ângulos microfibrilares, proporção de madeira de reação e conteúdo de lignina. As variações são encontradas, principalmente, nas dimensões celulares e na organização da parede celular (VIDAURRE et al., 2011). Além disso, a

madeira juvenil é menos estável dimensionalmente e uma das formas de melhorar essa característica é por meio do processo de modificação térmica do material.

A modificação térmica é um processo considerado simples, que pode ser reproduzido em grande escala (sem a utilização de produtos químicos tóxicos), estudado por vários pesquisadores em nível mundial, que utiliza altas temperaturas para melhorar a estabilidade dimensional e a resistência à biodeterioração da madeira. Contudo, as alterações químicas ocorridas podem resultar em mudanças negativas nas propriedades mecânicas do material.

Tratando-se da madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente, alguns autores verificaram melhorias na resistência à biodeterioração por fungos e na estabilidade dimensional. Por outro lado, as propriedades mecânicas têm seus índices reduzidos (BATISTA, 2012; CALONEGO, 2009; LENGOWSKI, 2011; MODES, 2010).

A madeira de *Tectona grandis* é reconhecida por apresentar boas características de resistência à biodeterioração e estabilidade dimensional. Comparativamente ao eucalipto, menos estudos foram realizados sobre a modificação térmica da madeira de teca (LOPES et al., 2014). Nesse contexto, esse processo pode não ser tão vantajoso em termos de melhorias das suas propriedades, mas resultados positivos podem ser alcançados para a madeira juvenil dessa espécie.

Em decorrência das premissas abordadas, foram levantados dois problemas de pesquisa ainda carentes de informação na literatura, a saber: i) em que nível o processo brasileiro de modificação térmica alterará as propriedades da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* e de *Tectona grandis*? ii) considerando que no Brasil a oferta de madeira juvenil de eucalipto é maior que a de teca, para qual espécie o processo trará melhores resultados?

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito do processo brasileiro de modificação térmica na composição química, em algumas propriedades físicas e mecânicas, e na resistência à biodeterioração da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar a madeira não tratada com aquela modificada termicamente a 160 °C, para ambas as espécies.
- Analisar a composição química (teores de lignina total, hemiceluloses e extrativos totais) da madeira das espécies estudadas.
- Comparar a utilização de quatro solventes na determinação do teor de extrativos: acetona, clorofórmio, diclorometano e etanol:tolueno.
- Avaliar as propriedades físicas (densidade aparente a 12%, higroscopicidade e inchamento total) e mecânicas (flexão estática e compressão paralela às fibras).
- Verificar a resistência à biodeterioração por fungos de podridão branca (*Trametes versicolor*), podridão parda (*Postia placenta*), térmitas subterrâneas (*Nasutitermes corniger*) e térmitas de madeira seca (*Cryptotermes brevis*).
- Comparar a madeira não tratada das espécies.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Eucalyptus grandis* W. Hill

As espécies do gênero *Eucalyptus* pertencem à família Myrtaceae, com diversas variedades, híbridos naturais e produzidos em laboratório, sendo conhecidas aproximadamente 700 espécies. É um gênero de grande plasticidade e dispersão mundial, crescendo em amplitude edafoclimática, superando as regiões de origem (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2017). Compreendem desde árvores de grande porte (100 m) até arbustos, abrangendo cerca de 95% da área florestal natural da Austrália.

A espécie *Eucalyptus grandis* é nativa do Norte de *New South Wales* e da Costa Sul de *Queensland*, na Austrália. A espécie apresenta-se em destaque, tendo em vista as altas taxas de produtividade das florestas plantadas, boa adaptação em grande parte do território brasileiro e disponibilidade considerável de florestas para uso industrial (ALZATE, 2014).

O Brasil é reconhecido como um dos principais países em termos de área de florestas plantadas com espécies de eucalipto, bem como detentor de elevado nível científico-tecnológico nas diversas áreas da eucaliptocultura, em função dos trabalhos realizados nas universidades, institutos de pesquisa e empresas florestais (BRITO; MOURA, 2011). Os plantios de eucalipto no Brasil ocupam 5,6 milhões de hectares, o que representa 72% do total das florestas plantadas, e estão localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (25%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (15%) (IBÁ, 2017).

O *Eucalyptus grandis* é considerado uma das espécies de maior importância comercial, sendo amplamente plantado no Brasil para a produção de madeira em função do seu rápido crescimento, boa adaptação ecológica e qualidade. Além disso, sua madeira é utilizada em múltiplos setores, por exemplo, na indústria moveleira, serrarias, construção civil, painéis, escadas, assoalhos, revestimentos e celulose e papel (ARAÚJO et al., 2012).

3.2 *Tectona grandis* L. f.

A espécie *Tectona grandis* L. f., conhecida popularmente como teca, pertence à família botânica Lamiaceae, árvore de grande porte, apreciada pela qualidade de sua madeira e resistência natural à biodeterioração por organismos xilófagos (PAES et al., 2015b). A teca ocorre naturalmente na Índia, Tailândia, Camboja, Vietnã e Java, possuindo boa adaptabilidade, sendo a espécie tropical mais plantada no mundo. Estima-se que 74% do total das plantações de espécies de folhosas sejam dessa espécie, que é cultivada há mais de 150 anos em mais de 50 países dentro e fora da área de sua distribuição natural (INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS – IPEF, 2015).

No Brasil, a *Tectona grandis* é cultivada em povoamentos florestais e tem um ciclo aproximado de 25 anos. As condições climáticas adequadas para o pleno desenvolvimento da espécie no Brasil proporcionam taxas de crescimento superiores às dos plantios da maioria dos países produtores dessa espécie florestal (PAES et al., 2015b).

A área de florestas plantadas de teca no Brasil no ano de 2016 equivalia a 88.270 ha (aumento de 31% em relação a 2012), aproximadamente 1,2% da área de florestas plantadas no País, sendo distribuída nos estados do Mato Grosso, Pará e Roraima (IBÁ, 2017). Plantios comerciais da espécie foram implantados em Cáceres – MT no início da década de 1970, que é o estado que possui a maior área plantada (FLÓREZ et al., 2014).

A teca tem sido reconhecida como uma madeira de alta qualidade, por causa de suas propriedades, tornando-a uma das madeiras mais valiosas do mundo junto a espécies como o cedro e o mogno (BHAT et al., 2001). A qualidade da madeira de teca é determinada por vários fatores, a saber: dimensões (altura e diâmetro), forma do fuste, relação cerne e alburno, regularidade dos anéis de crescimento, número de nós, cor e textura. Muitos destes fatores estão relacionados com a idade e tamanho da árvore e influenciam diretamente no valor de mercado do material (IPEF, 2015).

Trata-se de uma madeira leve a moderadamente pesada, de dureza média, elevada estabilidade dimensional, fácil trabalhabilidade, boa resistência mecânica e de múltiplo uso (LOPES et al., 2014). Destacam-se os usos na construção civil (portas, janelas, painéis, assoalhos e *decks*), em embarcações, lâminas decorativas e móveis (IBÁ, 2017).

3.3 MADEIRA JUVENIL

A madeira é um material heterogêneo que possui diferentes tipos de células que desempenham funções específicas. São significativas as variações nas composições químicas e anatômicas entre espécies, ocorrendo também dentro de uma mesma espécie, principalmente em função da idade, dos fatores genéticos e ambientais. Além disso, também ocorrem diferenças entre cerne e alburno, madeira juvenil e adulta e, em escala microscópica, entre células individuais (BROWNING¹, 1963 citado por LIMA, 2009).

A madeira juvenil corresponde a uma região central na árvore, formada durante a fase jovem do câmbio vascular, de formato cilíndrico, com diâmetro uniforme, estendendo-se desde a base até o topo (LEONELLO et al., 2008). Nas toras de árvores jovens, quase toda a madeira é juvenil, ao passo que nas toras de idade mais avançada, esse tecido representa somente uma porção do centro (BALLARIN; LARA PALMA, 2003). O período de formação da madeira juvenil varia de acordo com a espécie, condições ambientais e manejo (LEONELLO et al., 2008).

As propriedades da madeira juvenil são distintas e, em geral, inferiores às da formada na fase adulta da árvore; é caracterizada por maiores teores de lignina e hemiceluloses, ângulo microfibrilar, contração longitudinal, proporção de madeira de reação e largura dos anéis de crescimento. Por outro lado, possui menores densidade, resistência mecânica, comprimento de fibras, contração transversal, porcentagem de lenho tardio, espessura de parede e teor de celulose (LEONELLO et al., 2008).

A transição da madeira juvenil para adulta é gradativa e muitas características (comprimento dos traqueídeos, espessura da parede celular, ângulo microfibrilar, densidade e resistência mecânica) vão se modificando até atingirem certa estabilidade na madeira adulta (BALLARIN; LARA PALMA, 2003). O estudo da variação radial dessas características constitui um dos principais meios na definição do limite entre a madeira juvenil e adulta (VIDAURRE et al., 2011).

A definição exata do limite entre a madeira juvenil e adulta é de difícil obtenção, porque as propriedades utilizadas nesse tipo de avaliação possuem comportamento diferente no perfil radial do tronco nas espécies florestais. A determinação do ponto ou idade de transição permite classificar os materiais de acordo com as características exigidas para cada espécie e produto (VIDAURRE et al., 2011). A zona considerada

¹ BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: Interscience, 1963. 689 p.

juvenil, na maioria das espécies, corresponde à madeira produzida até os sete anos; a zona de transição corresponde a madeira produzida dos sete aos 23 anos; depois disso as árvores passam a produzir material adulto (BALLARIN; LARA PALMA, 2003).

Pesquisas salientaram que foi possível identificar a região de transição entre a madeira juvenil e adulta na espécie *Eucalyptus grandis* por meio da variação radial do comprimento das fibras. Para Leonello et al. (2008), a região juvenil ficou definida desde a medula até 15 cm do raio (aproximadamente 75% do raio médio) e a região adulta desde os 16 cm do raio até a casca. Para Ramos et al. (2011), a região juvenil correspondeu até os 13 cm, e entre 15 cm e 16 cm foi observado a menor taxa anual de incremento do comprimento das fibras.

A madeira de *Tectona grandis* oriunda de plantios da Índia foi caracterizada por Bhat et al. (2001), que reportaram a ocorrência de madeira juvenil até as idades de 15 a 25 anos, variando em função da propriedade estudada e da taxa de crescimento. Além disso, afirmaram que as propriedades anatômicas foram melhores para a delimitação do limite entre a madeira juvenil e a madeira adulta da espécie.

Bhat et al. (2001) encontraram diferença de cinco anos entre plantios de *Tectona grandis* para a estabilização do ângulo microfibrilar. Além disso, fatores como diâmetro de vasos e comprimento das fibras também apresentaram diferenças significativas na transição da madeira juvenil para adulta.

3.4 PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA

Desde a década de 1920 vêm sendo conduzidos estudos sobre o processamento da madeira a elevadas temperaturas (140 °C a 260 °C), com diferentes equipamentos e meios de transmissão de calor, com o objetivo de promover alterações na composição química da madeira que irão resultar em melhoria de algumas propriedades (BELLON et al., 2014). O processo de modificação térmica consiste na aplicação de calor à madeira, a fim de proporcionar melhorias nas propriedades do material, principalmente, reduzir a higroscopicidade, aumentar a estabilidade dimensional e a resistência à biodeterioração e ao intemperismo (BATISTA, 2012). Trata-se de um processo que não emprega produtos químicos tóxicos na madeira, o que é um aspecto relevante do ponto de vista ambiental (HILL, 2006).

A madeira modificada termicamente tem sido comercializada principalmente na Europa, onde vários processos foram patenteados, os quais são conhecidos como

Retification[®] e Perdure[®] (França); Oil Heat Treatment – OHT[®] (Alemanha); Plato[®] (Holanda) e ThermoWood[®] (Finlândia). As principais diferenças entre esses processos são a utilização de oxigênio ou nitrogênio, a presença ou ausência de vapor e a utilização ou não de óleo vegetal como meio de aquecimento (BATISTA, 2012).

Os estudos de modificação térmica iniciaram no Brasil na década de 1980, em escala laboratorial. As pesquisas brasileiras cresceram em frequência a partir do ano 2006, apresentando-se resultados positivos e negativos, sendo portanto, um tema relativamente novo e pouco explorado (BATISTA, 2012). Diversas vantagens às propriedades da madeira têm sido alcançadas, que dependem especialmente do processo (temperatura final, duração do ciclo e taxa de aquecimento) e das propriedades iniciais da madeira (ARAÚJO et al., 2012).

Existem poucas empresas no Brasil que realizam o processo de modificação térmica em escala industrial, que tem sido aplicado basicamente em madeiras de reflorestamento, tais como *Eucalyptus* spp., *Pinus* spp. e *Tectona grandis* (RILLING, 2010). Em algumas pesquisas, o processo de modificação térmica da madeira foi realizado em equipamentos de laboratório, tais como as autoclaves, estufas elétricas e muflas (CALONEGO, 2009; MODES, 2010). Algumas pesquisas utilizaram o processo brasileiro em escala industrial para avaliar as propriedades da madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* (BATISTA, 2012; BELLON, 2013) e *Tectona grandis* (BELLON, 2013; LENGOWSKI, 2011).

3.5 PROPRIEDADES DA MADEIRA E EFEITO DO PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA

3.5.1 Composição química

A composição química da madeira difere significativamente entre espécies e é uma característica importante, pela sua influência em algumas das propriedades que definem a aptidão do material para determinados usos. Os principais elementos químicos presentes são carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) e pequenas quantidades de nitrogênio (N) (TSOUMIS, 1991). Os elementos orgânicos (C, H e O) se combinam para formar os principais constituintes elementares da madeira (HILL, 2006).

Todas as madeiras são constituídas de celulose, hemiceluloses, lignina, pectina e amido. Além desses compostos, ocorre uma quantidade variável de extrativos e uma

pequena quantidade de elementos inorgânicos, tais como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) (HILL, 2006; SANTOS, 2008).

O processo de modificação térmica tende a alterar a proporção dos compostos químicos da madeira de acordo com a resistência térmica de cada um quando exposto ao processo (BELLON, 2013; ESTEVES et al., 2008; PAES et al., 2016). A temperatura, isoladamente, não é o único fator responsável pelas transformações ocorridas na madeira modificada termicamente., mas também a duração do processo, a taxa de aquecimento, a atmosfera, a pressão e a espécie (ARAÚJO et al., 2012). Celulose e lignina degradam-se de forma mais lenta e a temperaturas mais elevadas do que as hemiceluloses; os extrativos têm degradação simples, em que alguns compostos evaporam da madeira durante o processo, ao passo que outros são produzidos (ESTEVES; PEREIRA 2009).

A madeira de *Eucalyptus grandis* é constituída por pequenas quantidades de açúcares de baixo peso molecular, amidos, gomas, taninos ou outros pigmentos solúveis (BATISTA, 2012). Silva et al. (2005) relataram amplitudes nos teores de holocelulose, lignina e extrativos totais para a madeira de *Eucalyptus grandis* de 67% a 90%, 13% a 28% e 2,5% a 6,87%, respectivamente.

Para a madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente pelo processo brasileiro (140 °C, 160 °C e 180 °C), Batista et al. (2016) reportaram que as temperaturas utilizadas não foram suficientes para causar a perda de massa de celulose. O teor de holocelulose diminuiu com o aumento de temperatura, o de lignina insolúvel manteve-se constante a 140 °C e 160 °C e aumentou em proporção apenas com o tratamento a 180 °C. O teor de extrativos totais aumentou significativamente a partir de 160 °C. Em outro trabalho (LENGOWSKI, 2011), para o mesmo processo e espécie, porém apenas para a temperatura de 160 °C, foram reportadas médias dos teores de lignina, holocelulose e extrativos totais iguais a 30%, 59% e 9,8%, respectivamente.

Para a madeira de *Tectona grandis* proveniente de diferentes locais na Costa Rica, foi concluído que materiais oriundos de regiões secas tiveram maiores teores de lignina (31%), extrativos (11,5%) e compostos inorgânicos (4,9%) quando comparados com aqueles de regiões úmidas (GONZÁLEZ, 2004). Para a madeira modificada termicamente da mesma espécie, Bellon et al. (2014) relataram maior redução do teor de holocelulose a 160 °C. Soratto (2012) também reportou a mesma tendência de redução no teor de holocelulose em diferentes métodos e temperaturas do processo de modificação térmica para o *Eucalyptus* sp.

3.5.2 Solubilidade dos componentes químicos da madeira

A madeira é constituída por seus componentes estruturais (celulose, lignina e hemiceluloses) e por diversos compostos não estruturais presentes na parede celular, chamados de extrativos (GOMIDE et al., 2005). Os mesmos são substâncias de baixa ou média massa molecular, que podem ser extraídas em solventes orgânicos e inorgânicos.

Os principais constituintes da madeira solúveis em água são alguns sais, carboidratos (oligossacarídeos e polissacarídeos). Os compostos solúveis em solventes orgânicos pertencem às classes dos ácidos e ésteres graxos, álcoois de cadeia longa, esteróides, compostos fenólicos e glicosídeos (CRUZ et al., 2006).

Alguns solventes são utilizados para análise dos extrativos em amostras de madeira, polpa e papel, . em que acetona, diclorometano e etanol-tolueno têm sido mais utilizados (TAPPI, 1997). Algumas alternativas têm sido empregadas para a determinação do teor de extrativos na madeira, por exemplo, o uso das misturas de solventes como etanol-tolueno (2:1), tolueno-etanol (2:1), etanol-benzeno (1:2), clorofórmio-metanol (2:1) ou de outros solventes menos convencionais, tal como o éter de petróleo (TAPPI, 1997).

O diclorometano, oferece riscos à saúde humana e ao ambiente. Já a acetona, apesar de não oferecer praticamente nenhum risco, tem a desvantagem de extrair alguns componentes hidrofílicos, como açúcares e compostos fenólicos (TAPPI, 1997).

Foram identificados nos cromatogramas dos extrativos da madeira de *Eucalyptus grandis*, 42 compostos no extrato em acetona, 49 em diclorometano e 52 no extrato em etanol-tolueno . Dentre eles, os esteróides foram os mais expressivos (41,9%), seguidos pelos ácidos graxos (26,5%), álcoois de cadeia longa (7,44%), carboidratos (14,7%) e compostos aromáticos (13,8%) (SILVÉRIO et al., 2006). No Quadro 1 encontra-se a síntese das substâncias extraídas da madeira de *Eucalyptus grandis* conforme o uso de diferentes solventes.

Para *Tectona grandis*, poucos são os trabalhos encontrados, mas Haupt et al. (2003) mencionaram que os solventes comumente utilizados para análise do teor de extrativos na espécie são os orgânicos voláteis, soluções alcalinas diluídas e água quente. Os extrativos identificados na madeira dessa espécie foram os compostos quinônicos (quinonas), que incluem as antraquinonas (principalmente as tectoquinonas e β -sitosterol), benzoquinonas, fitoquinonas, naftoquinonas, plastoquinonas e ubiquinonas.

Quadro 1. Componentes químicos identificados nos extratos de *Eucalyptus grandis* acetona, clorofórmio, diclorometano e etanol-tolueno

Solvente	Classes	Substâncias extraídas
Acetona	Compostos alifáticos	Ácidos graxos e hidrocarbonetos
Clorofórmio	Compostos fenólicos	Ácidos graxos, álcoois e carboídratos
Diclorometano	Compostos fenólicos	Ácidos graxos, ácidos carboxílicos, álcoois, ésteres e esteróis
Etanol-tolueno	Compostos alifáticos	Ácidos graxos e hidrocarbonetos

Fonte: Adaptado de Barbosa, Maltha e Cruz (2005).

Não foram encontrados trabalhos sobre a identificação de compostos extraídos de madeira modificada termicamente, tanto para *Tectona grandis* quanto para *Eucalyptus grandis*.

3.5.3 Propriedades físicas

As propriedades físicas mais importantes que caracterizam a madeira são a densidade, a higroscopicidade e a retratibilidade (WIEDENHOEFT; MILLER, 2005). A densidade é a mais utilizada como parâmetro de seleção, sendo influenciada principalmente pela interação entre o material genético e o ambiente, podendo variar também em função de outros fatores, tais como a idade e taxa de crescimento das árvores, os tratamentos silviculturais e a posição de amostragem da madeira no fuste (ALZATE, 2014).

A madeira, sendo um material higroscópico, tem sua densidade influenciada pela umidade (WIEDENHOEFT; MILLER, 2005). Calonego (2009) descreve a densidade aparente da madeira como uma das características que melhor expressa a sua qualidade para a transformação industrial.

De acordo com Oliveira (2009), a retratibilidade da madeira é um fenômeno decorrente da variação dimensional, em função da troca de umidade com o meio, em que as dimensões da madeira alteram-se substancialmente com a variação da umidade no intervalo de 0% até o ponto de saturação das fibras. Nesta amplitude, conhecida como intervalo higroscópico, a redução ou o aumento da umidade fazem com que a madeira tenha suas dimensões alteradas, contraindo e inchando, respectivamente.

A elevada retratibilidade da madeira das espécies do gênero *Eucalyptus* é um dos principais problemas para a sua utilização em produtos sólidos do processamento mecânico secundário, tais como forros, pisos e móveis (LOPES et al., 2014). Quanto maior a densidade da madeira, maior será a retratibilidade, havendo uma relação praticamente linear entre essas propriedades dentro do limite higroscópico (BATISTA; KLITZKE, 2010).

A realização do processo de modificação térmica causa a redução da densidade aparente e da higroscopicidade e, por conseguinte, da retratibilidade da madeira. A magnitude desta alteração depende da perda de massa, que está relacionada com as condições de processo a que a madeira é submetida (HILL, 2006).

A madeira da espécie *Eucalyptus grandis* possui média de densidade aparente a 12% próxima a $0,518 \text{ g cm}^{-3}$ e da *Tectona grandis* próxima a $0,660 \text{ g cm}^{-3}$ (BRITO et al., 2006; GARCIA et al., 2016; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT, 1997², citado por IPT, 2017). O processo de modificação térmica tende a diminuir a densidade aparente da madeira.

Batista (2012) reportou redução de 6,1% na densidade aparente da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a temperatura de 160 °C; enquanto Calonego (2009) relatou redução significativa de 2,6% para as mesmas espécie e temperatura. Para *Tectona grandis* modificada termicamente a 180 °C, Lopes et al. (2014) reportaram redução significativa da densidade aparente em 13,8%.

A umidade de equilíbrio em condições climatizadas tem sido utilizada como medida da higroscopicidade da madeira em trabalhos sobre modificação térmica. Algumas pesquisas mostraram que a modificação térmica reduziu a higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus grandis* em cerca de 4 a 5 p.p., resultando em redução na contração e no inchamento (CALONEGO et al., 2012). Após a modificação térmica, Lopes et al. (2014) relataram que o teor de umidade de equilíbrio a 12% da madeira de *Tectona grandis* diminuiu em média 52%, confirmando que o processo traz benefícios à madeira, como a redução da higroscopicidade.

A melhoria significativa da estabilidade dimensional da madeira de *Eucalyptus grandis* (em torno de 50%), mediante o processo de modificação térmica entre 180 °C e 200 °C, foi reportada por Brito et al. (2006) e Bal e Bektas (2012).

² INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO/SECRETARIA DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Madeiras**: material para o *design*. São Paulo: IPT, 1997. 73 p.

3.5.4 Propriedades mecânicas

As propriedades de resistência mecânica são estimativas da capacidade de um material resistir às forças externas que tendem a causar deformação no mesmo (TSOUMIS, 1991). O conhecimento dessas propriedades é importante no desenvolvimento de projetos de produtos que estarão submetidos a esforços mecânicos, tais como em estruturas de madeira, móveis e pisos, por exemplo.

Para a determinação das propriedades mecânicas são executados ensaios padronizados em amostras sem defeitos. Os principais ensaios são: flexão estática (módulo de ruptura e módulo de elasticidade), compressão paralela às fibras, cisalhamento, dureza e tração paralela às fibras (GLASS; ZELINKA, 2010).

Os módulos de ruptura (MOR) e elasticidade (MOE) na flexão estática são dois parâmetros de considerável importância na caracterização tecnológica da madeira. Ambos fornecem uma boa aproximação da resistência do material, constituindo-se, na prática, parâmetros de vasta aplicação na classificação dos materiais (BAL; BEKTAS, 2012).

As propriedades mecânicas da madeira são influenciadas por fatores diversos, tais como características anatômicas, idade da árvore, ângulo da grã, teor de umidade, temperatura, constituintes químicos; densidade, duração da tensão e deformação; falhas na madeira e presença de nós (GATTO et al., 2008). A madeira de lenho juvenil tem resistência mecânica inferior à madeira adulta, influenciada pelas diferenças anatômicas que irão refletir em menor densidade (BALLARIN; LARA PALMA, 2003).

A modificação térmica causa perda de massa dos constituintes estruturais da parede celular, resultando em benefícios na higroscopicidade e estabilidade dimensional. Por outro lado, a perda de massa também causa redução na densidade aparente e, por conseguinte, a resistência mecânica pode ser afetada negativamente (HILL, 2006).

Calonego (2009), avaliando a resistência da madeira de *Eucalyptus grandis* à flexão estática, constatou que não houve diferença significativa entre as médias da madeira não tratada e daquelas modificadas termicamente a 140 °C e a 160 °C, tanto para o MOR quanto para o MOE. O efeito do processo de modificação térmica na flexão estática da madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* aumentou o MOR em 3% e reduziu o MOE em 4,5%, respectivamente (MODES, 2010). Por outro lado, Batista (2012) reportou reduções de 42% e 25% para o MOR e MOE da madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente a 160 °C, respectivamente.

Analisando o comportamento da compressão paralela às fibras da espécie *Eucalyptus grandis*, Modes (2010) relatou que a modificação térmica aumentou a resistência das peças em 6%, enquanto Batista (2012) reportou redução de 43% e 3% para o MOR e MOE, respectivamente. Calonego (2009) avaliou a mesma espécie e constatou que não houve diferença significativa entre a média da madeira não tratada e a dos tratamentos modificados termicamente (140 °C a 220 °C), tanto para o MOR quanto para o MOE.

Outros autores reportaram redução da resistência mecânica (ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras) com o processo de modificação térmica a temperaturas que variaram de 140 °C a 220 °C (ESTEVES; PEREIRA, 2009; KAMDEM et al., 2002).

3.5.5 Resistência à biodeterioração

A resistência à deterioração (ou durabilidade natural) é a capacidade que cada espécie madeireira possui de resistir à ação de agentes deterioradores, em que os principais são os agentes biológicos, podendo também ocorrer agentes físicos e químicos. A resistência à deterioração varia entre espécies e entre indivíduos de uma mesma espécie (PAES et al., 2015b).

A madeira é biologicamente deteriorada porque os organismos reconhecem os polímeros (carboidratos) da parede celular como fonte de nutrição (BELLON et al., 2014). Dependendo das condições ambientais, haverá maior ou menor suscetibilidade a deterioração (PAES et al., 2007).

Fungos e térmitas encontram-se entre os organismos xilófagos mais comuns, em que os primeiros podem decompor totalmente a madeira ou apenas causar manchas e são classificados como apodrecedores, emboloradores ou manchadores. As térmitas são consideradas, entre os insetos, as principais responsáveis por causar danos à madeira e derivados em nível mundial. Conforme seus hábitos, são classificadas como subterrâneas, de madeira seca e de madeira úmida (MOTTA et al., 2013).

De acordo com o IPT (2017), a madeira de *Eucalyptus grandis* é classificada como de durabilidade natural moderada ao ataque de fungos apodrecedores. Segundo Bellon et al. (2014), as madeiras de eucalipto têm baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos. A *Tectona grandis* possui alta durabilidade natural, apresentando elevada

resistência à ação de fungos apodrecedores e insetos, podendo ser enterrada, exposta ao ambiente externo ou à umidade (IPT, 2017; MOTTA et al., 2013).

A modificação térmica aumenta consideravelmente a resistência da madeira à biodeterioração por fungos, que pode ser explicada por quatro razões: a geração de novos extrativos durante o processo (atuando como fungicidas), a modificação química dos polissacarídeos e lignina (inibição enzimática degradativa), degradação das hemiceluloses e redução da higroscopicidade (BELLON et al., 2014; PESSOA et al., 2006).

A grande vantagem da utilização dos processos de modificação térmica em comparação aos métodos preservantes tradicionais, é a não utilização de produtos químicos tóxicos na madeira, e a modificação de sua estrutura química pela ação física do calor (BELLON et al., 2014). Alterações químicas nas paredes celulares, causadas pelo processo de modificação térmica a temperaturas acima de 150 °C, são consideradas efetivas para aumentar a resistência da madeira ao ataque de fungos, pois melhoram a sua durabilidade natural (BOONSTRA et al., 2007).

De acordo com estudos realizados com a madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente, a espécie foi classificada como de resistência moderada à biodeterioração causada por fungos (VIVIAN et al., 2015). Para a *Tectona grandis* (natural e modificada termicamente) os resultados encontrados não diferiram muito. A espécie é menos biodeteriorada em comparação ao *Eucalyptus* sp., por ser naturalmente resistente à ação de fungos xilófagos e, portanto, a modificação térmica não influencia significativamente a resistência à biodeterioração dessa espécie (BELLON, 2013).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A coleta das madeiras juvenis das espécies *Eucalyptus grandis* W. Hill e *Tectona grandis* L. f. foi realizada na empresa *TWBrazil*, a qual é uma das detentoras da patente do processo brasileiro de modificação térmica e que produz madeira modificada termicamente para uso interno.

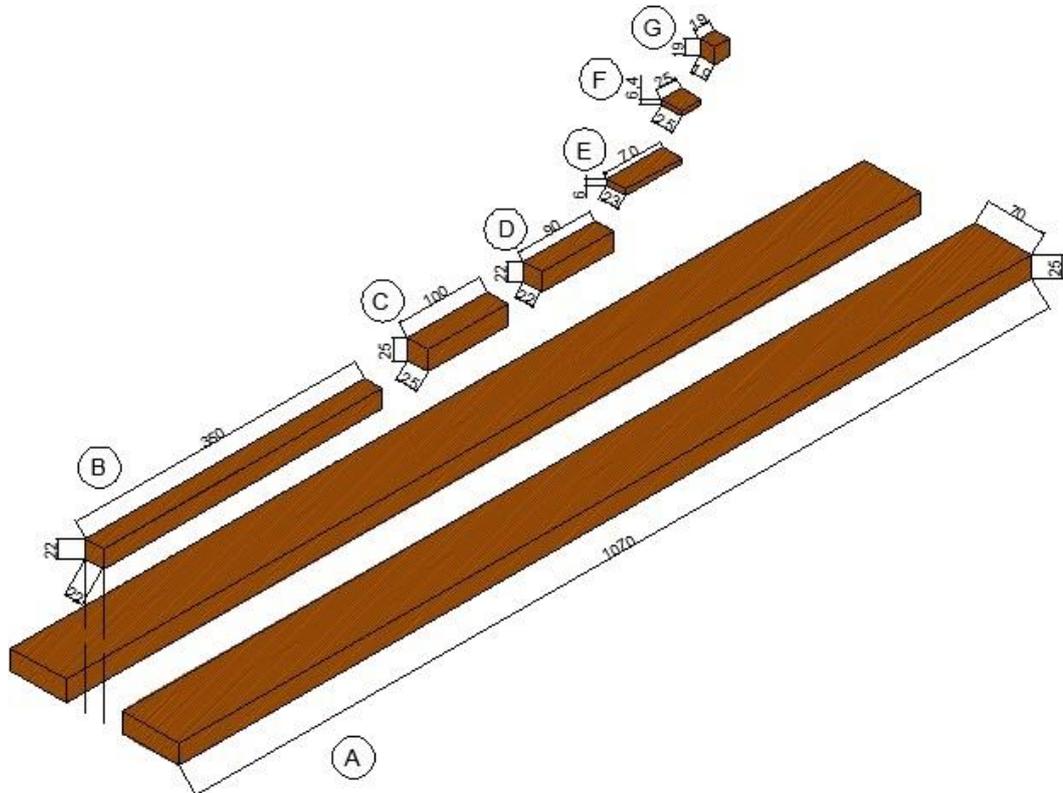
A madeira de *Eucalyptus grandis* foi oriunda de árvores de sete anos de idade, de um povoamento pertencente à empresa Klabin. A madeira de teca foi oriunda de árvores desbastadas, entre 15 e 18 anos de idade, de um povoamento pertencente à empresa Floresteca, localizada em Cáceres, Mato Grosso.

A madeira de ambas as espécies foi coletada na forma de sarrafos de 25 x 70 x 1.070 mm (radial x tangencial x longitudinal), em que para cada uma foram amostradas 12 peças por tratamento, três por lote representativo do estoque. Os sarrafos amostrados corresponderam àqueles serrados próximos à medula, porém sem este tecido, em que para ambas as espécies as peças continham tecidos de cerne juvenil e alburno.

Quatro tratamentos foram investigados: 1) *Eucalyptus grandis* não tratado; 2) *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; 3) *Tectona grandis* não tratada; e 4) *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C. O processo de modificação térmica foi realizado com a utilização de um programa específico e de propriedade da empresa, caracterizado como higrotérmico e realizado em cinco fases, com duração total de aproximadamente 16 horas (incluindo oito horas de resfriamento). Maiores detalhes da descrição do processo podem ser verificados em Batista et al. (2015).

Na Figura 1 encontra-se uma representação da produção dos corpos de prova dos diferentes ensaios nos sarrafos originais.

Figura 1. Representação da obtenção dos corpos de prova: A – sarrafo original; B – flexão estática; C – densidade aparente, higroscopicidade e inchamento total; D – compressão paralela às fibras; E – térmitas de madeira seca; F – térmitas subterrâneas; G – fungos apodrecedores. Dimensões em mm.



Fonte: A autora.

4.2 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Química da Madeira da UFES. A madeira restante da obtenção dos corpos de prova (Figura 1) foi moída em moinho de martelos e posteriormente em moinho do tipo *Willey*, classificada em peneiras sobrepostas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 mesh (abertura de 0,42 mm) e ficou retida na de 60 mesh (0,25 mm). Em seguida, a serragem foi acondicionada em sala climatizada para homogeneização da umidade (25 °C e 60% de umidade relativa) por um período de duas semanas.

A serragem dos sarrafos de um mesmo tratamento foi misturada, formando uma amostra composta, da qual foram tomadas cinco duplicatas para cada análise química. No Quadro 2 encontra-se o resumo das análises químicas por tratamento. Para a análise do teor de extrativos foram utilizados quatro solventes, a saber: acetona, clorofórmio, diclorometano e etanol-tolueno (1:2).

Quadro 2. Descrição das análises químicas realizadas e seus respectivos métodos

Características químicas	Método	Referência
Extrativos	T 204 cm-97	Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI (1997)
Solubilidade em água fria e água quente	T 207 cm-99	Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI (1999)
Lignina	Lignina Klason insolúvel e solúvel em ácido	Gomide e Demuner (1986) Goldschmid (1971)
Hemiceluloses	T 223 cm-01	Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI (2001)

Fonte: A autora.

A determinação do teor de lignina solúvel foi realizada por espectroscopia de infravermelho, em um espectrofotômetro BEL Photonics SP 2000 UV. Para os registros dos espectros, as amostras foram analisadas em dois comprimentos de onda de radiação eletromagnética, a saber, 215 nm e 280 nm.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Para analisar o efeito da modificação térmica na densidade aparente, na higroscopicidade e no inchamento total da madeira utilizou-se a norma 462 da *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* (COPANT, 1972). Para todos os ensaios utilizou-se os mesmos corpos de prova, devidamente orientados em relação aos anéis de crescimento, totalizando 10 por tratamento, nas dimensões de 25 x 25 x 100 mm (radial x tangencial x longitudinal).

Inicialmente, os corpos de prova foram pesados em balança digital semianalítica (0,01 g de precisão) para determinação da massa inicial. Depois, foram levados para câmara climática à temperatura de 25 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa (12% de umidade de equilíbrio), e tiveram suas massas verificadas em intervalos de três dias até atingirem massa constante. A umidade de equilíbrio em câmara climática foi utilizada como medida da higroscopicidade da madeira.

Em seguida, os corpos de prova foram medidos nas três direções estruturais, utilizando-se um micrômetro digital (0,001 mm de precisão – direções radial e tangencial)

e um paquímetro digital (0,01 mm – direção longitudinal), para a determinação das dimensões em câmara climática

Os corpos de prova foram imersos em água por um período de aproximadamente quatro semanas, aplicando-se vácuo intermitente até completa saturação. Depois de saturados, os corpos de prova tiveram a massa e as dimensões medidas novamente, seguindo o mesmo método.

As amostras foram dispostas ao ar por cerca de 15 dias, para perderem a água capilar e levadas a uma estufa, seguindo o seguinte programa, com duração de 24 horas para cada fase: 40 °C, 60 °C, 80 °C e 103 °C. Em seguida, os corpos de prova foram pesados e medidos pela última vez. Para o cálculo da densidade aparente, da umidade de equilíbrio e do inchamento total foram utilizadas as Equações 1, 2 e 3 (TSOUMIS, 1991), respectivamente:

$$\rho = M/V \quad (1)$$

$$UE = (M - M_{0\%}) / M_{0\%} \times 100 \quad (2)$$

$$\alpha_{(t,r,v)} = (D_s - D_{0\%}) / D_{0\%} \times 100 \quad (3)$$

Em que – ρ : densidade aparente (g cm^{-3}); M: massa na condição estabilizada em câmara climática (g); V: volume na condição estabilizada em câmara climática (cm^3); UE: umidade de equilíbrio (%); $M_{0\%}$: massa anidra (g); $\alpha_{(t, r, v)}$: inchamento total (tangencial, radial ou volumétrico – %); D_s : dimensão saturada (radial, tangencial ou volume); e D_0 : dimensão anidra (radial, tangencial ou volume).

4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para avaliar a resistência mecânica da madeira foram realizados os ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras, ambos conforme a norma D 143 da *American Standard for Testing and Materials* – ASTM (2008a). Para cada tratamento e ensaio foram produzidos 12 corpos de prova, previamente condicionados em câmara climática (25 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa) até atingirem massa constante. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal EMIC, modelo DL 10000 N/S 8622, de 10 toneladas de capacidade, acoplada a um computador, dotado do *software* Tesc, versão 1.10, que calculou e registrou a resistência mecânica de cada corpo de prova.

Para o ensaio de flexão estática utilizou-se corpos de prova de 22 x 22 x 350 mm (radial x tangencial x longitudinal). Os mesmos tiveram as dimensões adaptadas, mantendo a relação L/h (vão e altura) dentro do limite de 14, preconizado pela norma. A distância entre os apoios foi igual a 310 mm e a velocidade de carregamento de 10 mm min⁻¹. Para cada corpo de prova foram calculados os módulos de ruptura (MOR) e elasticidade (MOE).

Para o ensaio de compressão paralela às fibras utilizou-se corpos de prova de 22 x 22 x 90 mm (radial x tangencial x longitudinal) e velocidade de carregamento igual a 4 mm min⁻¹. O *software* utilizado calculou a força máxima e o módulo de ruptura.

4.5 ENSAIOS DE BIODETERIORAÇÃO

Para verificar o efeito da modificação térmica na resistência à biodeterioração, os tratamentos foram submetidos a ensaios com fungos xilófagos (podridão parda e branca) e térmitas (subterrâneas e de madeira seca).

4.5.1 Fungos apodrecedores (podridão parda e branca)

Os ensaios foram realizados conforme a norma D 1413 (ASTM, 2008b), em que foram testados 12 corpos de prova por tratamento, nas dimensões de 19 x 19 x 19 mm (radial x tangencial x longitudinal), submetidos à ação dos fungos apodrecedores *Postia placenta* (podridão parda) e *Trametes versicolor* (podridão branca). Inicialmente, os corpos de prova foram colocados em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante, e pesados em balança analítica (0,0001 g de precisão) para a determinação da massa anidra inicial.

Os ensaios foram realizados em frascos de vidro transparente de 500 mL, com boca larga e tampa rosqueável, preenchidos com 300 g de solo com pH de 6,9. Calculou-se a capacidade de retenção de água (ideal entre 20% a 40%), e o solo de cada frasco foi umedecido de acordo com o resultado obtido (24%). Placas alimentadoras de madeira de *Pinus* sp. (3 x 28 x 35 mm) foram adicionadas aos frascos esterilizados em autoclave a 121 ± 2 °C por 30 minutos.

Depois do resfriamento dos frascos, porções de culturas puras dos fungos foram inoculadas nas placas alimentadoras. Após o desenvolvimento dos fungos nas placas e a

colonização dos mesmos no solo, adicionou-se dois corpos de prova por frasco, sendo um de madeira de *Eucalyptus grandis* e outro de *Tectona grandis* (Figura 2).

Figura 2. Aspecto dos frascos inoculados com *Postia placenta* (esquerda) e *Trametes versicolor* (direita)



Fonte: A autora.

O ensaio foi conduzido em sala climatizada (27 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa) por um período de 12 semanas, juntamente com outros quatro frascos (sem fungos), que foram utilizados para a avaliação da perda de massa operacional, que foi utilizada como fator de correção do consumo de madeira provocado pelos fungos. Desse modo, garantiu-se que as perdas observadas foram atribuídas apenas ao ataque dos fungos apodrecedores, e não a fatores operacionais.

Decorridas as 12 semanas, o ensaio foi desativado, retirando-se os corpos de prova dos frascos e os micélios dos fungos foram removidos cuidadosamente, sob água corrente, com o uso de escovas com cerdas macias. Os corpos de prova tiveram a massa anidra final determinada da mesma forma que no início do ensaio, e a perda de massa foi calculada conforme a Equação 4. Depois de calculada e corrigida pela perda de massa operacional, classificou-se a perda de massa em classes de resistência, conforme apresentado no Quadro 3.

$$PM=(MAi-MAf)/MAi \times 100 \quad (4)$$

Em que – PM: perda de massa (%); MAi: massa anidra inicial (g); e MAf: massa anidra final (g).

Quadro 3. Classificação da perda de massa em ensaio de resistência a fungos apodrecedores

Perda de Massa (%)	Massa Residual (%)	Classe de Resistência
0 – 10	90 – 100	Altamente resistente
11 – 24	76 – 89	Resistente
25 – 44	56 – 75	Moderadamente resistente
≥ 45	≤ 55	Não resistente

Fonte: ASTM D 2017 (2008).

4.5.2 Térmitas subterrâneas

O ensaio de alimentação forçada foi realizado conforme a norma D 3345 (ASTM, 2008d), com algumas adaptações sugeridas por Paes et al. (2015b). Foram testados 10 corpos de prova por tratamento, nas dimensões de 6,4 x 25 x 25 mm (radial x tangencial x longitudinal), submetidos à ação das térmitas subterrâneas *Nasutitermes corniger* Motsch. Para tanto, coletou-se uma colônia nas proximidades do município de Jerônimo Monteiro – ES, a qual estava fixada à uma árvore de goiabeira (*Psidium guajava* L.).

Após a coleta da colônia com as térmitas, a mesma foi posta em uma caixa de fibrocimento de 250 L de capacidade, com uma camada de areia úmida de aproximadamente 10 cm, contendo quatro camadas de papelão umedecido (diariamente), facilitando a captura das mesmas (Figura 3). A caixa foi apoiada sobre quatro tijolos, imersos em recipientes com água e óleo, para evitar a fuga dos insetos. A colônia foi acomodada no centro da caixa sobre uma bandeja plástica, apoiada sobre dois tijolos, impedindo o contato direto com a areia e obrigando os mesmos a saírem da colônia e forragearem o papelão em contato com a areia.

Figura 3. Colônia de térmitas subterrâneas *Nasutitermes corniger*



Fonte: A autora.

Os corpos de prova foram previamente secos em estufa a $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, até atingirem massa constante, e pesados em balança analítica (0,0001 g de precisão) para a determinação da massa anidra inicial. Utilizou-se frascos de vidro transparente de 600 mL, com boca larga e tampa rosqueável, preenchidos com 200 g de areia lavada, previamente esterilizada em estufa a $110 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 horas, cuja umidade foi corrigida de acordo com a sua capacidade de retenção, com a adição de 34 mL de água destilada. Em seguida, foi adicionado um corpo de prova por frasco, enterrado até a metade do comprimento, apoiado em uma das paredes do frasco e $1 \pm 0,05$ g de térmitas subterrâneas (média de 330 térmitas: 75% de operários e 25% de soldados). Além dos corpos de prova de cada tratamento foi montada uma série controle com a madeira de *Pinus* sp.

O ensaio foi conduzido em sala climatizada ($27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa), durante 28 dias. Decorrido o prazo, o ensaio foi desativado e os corpos de prova foram retirados dos frascos, limpos com um pincel, e tiveram a massa anidra final determinada conforme o procedimento inicial. Para cada corpo de prova foi atribuída uma nota correspondente ao desgaste causado pelas térmitas, além da porcentagem de mortalidade, conforme o Quadro 4.

Quadro 4. Avaliação do desgaste da madeira e da mortalidade das térmitas

Tipos de Desgaste	Nota
Sadio, permitindo escarificações superficiais	10
Ataque leve, sem penetração	9
Ataque moderado, com penetração	7
Ataque intenso	4
Falha, havendo ruptura dos corpos de prova	0
Mortalidade	(%)
Baixa	0 – 33
Moderada	34 – 66
Alta	67 – 99
Total	100

Fonte: Adaptado de ASTM D 3345 (2008d).

A perda de massa (%) dos corpos de prova foi calculada e corrigida pela perda de massa operacional (Equação 4), conforme a norma D 1413 (ASTM, 2008b). Para a avaliação do tempo (dias) para a morte das térmitas foram seguidas as orientações de Paes (1997).

4.5.3 Ensaio com térmitas de madeira seca

O ensaio foi realizado conforme um método proposto pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT, 1980). Utilizou-se 10 corpos de prova por tratamento, nas dimensões de 70 x 23 x 6 mm (longitudinal x radial x tangencial), que foram submetidos à ação de térmitas de madeira seca *Cryptotermes brevis* Walker. Além dos corpos de prova de cada tratamento foi montada uma série controle com a madeira de *Pinus* sp., como proposto pela metodologia utilizada. Os corpos de prova foram previamente secos em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante, e pesados em balança analítica (0,0001 g de precisão) para a determinação da massa anidra inicial.

Para cada tratamento, os corpos de prova foram agrupados ao pares, formando cinco conjuntos por tratamento e sobre cada par foi fixado um recipiente de vidro de 35 mm de diâmetro x 40 mm de altura, utilizando-se parafina. Dentro de cada recipiente foram introduzidas 40 térmitas, sendo 39 operários e um soldado. Depois de montados, cada par foi disposto em uma placa de Petri para evitar a fuga das térmitas (Figura 4).

Figura 4. Corpos de prova do ensaio de resistência ao ataque de térmitas de madeira seca: ENT – *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT – *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT – *Tectona grandis* não tratada; TMT – *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C.



Fonte: A autora.

O ensaio foi conduzido em uma sala climatizada (27 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa), durante 45 dias. Ao término do experimento, as térmitas remanescentes foram retiradas e contadas para avaliação da porcentagem de mortalidade; também foi avaliado o desgaste causado às amostras e o número de orifícios produzidos nos corpos de prova. Foram considerados como orifícios apenas aqueles que transpassaram os corpos de prova (IPT, 1980). O desgaste foi atribuído por meio de notas, sendo nota 0 (nenhum desgaste), 1 (desgaste superficial), 2 (desgaste moderado), 3 (desgaste acentuado), 4 (desgaste profundo). Calculou-se a perda de massa dos corpos de prova (Equação 4), e corrigiu-se pela perda de massa operacional, conforme a norma D 1413 (ASTM, 2008b).

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) e o nível de significância adotado foi de até 5% de probabilidade para todos os testes.

Para os dados contínuos verificou-se a normalidade pelo teste Lilliefors e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Cochran.

Foram avaliados quatro tratamentos resultantes da combinação dos fatores espécie (dois níveis) e processo (dois níveis), e o efeito dos tratamentos foi verificado pela aplicação da análise de variância (ANOVA). Confirmada a rejeição da hipótese nula, aplicou-se o teste de Tukey para a diferenciação das médias.

O DIC em arranjo fatorial foi utilizado para as análises de perda de massa do ensaio de biodeterioração por fungos apodrecedores e para a solubilidade em acetona, clorofórmio, diclorometano e etanol-tolueno. No primeiro caso foram testados os fatores processo (dois níveis), espécie (dois níveis) e fungo (dois níveis). No segundo caso foram testados os fatores processo (dois níveis), espécie (dois níveis) e solvente (quatro níveis). O efeito dos fatores, bem como a interação entre eles, foi verificado pela ANOVA e nos casos em que foi confirmada a rejeição da hipótese nula, aplicou-se o teste de Tukey para diferenciação das médias.

Para os dados discretos gerados nos ensaios das térmitas (notas do desgaste e quantidade de orifícios produzidos) utilizou-se o teste não paramétrico H de Kruskal-Wallis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISES QUÍMICAS

Na Tabela 1 encontram-se os resultados das análises químicas por tratamento. De acordo com o teste de Cochran, as variâncias dos tratamentos foram homogêneas ($P > 0,05$) para os teores de hemiceluloses, extrativos totais e extrativos em água fria, aplicando-se a ANOVA em seguida. Conforme o teste F, para essas análises químicas, pelo menos uma média dos tratamentos foi diferente das demais ($P < 0,05$).

De acordo com o teste de Cochran, as variâncias dos tratamentos não foram homogêneas ($P < 0,05$) para os teores de lignina total e de extrativos em água quente e, dessa forma, foi utilizado o teste H, que indicou que houve diferença significativa ($P < 0,05$) entre pelo menos uma das médias para essas análises químicas.

Tabela 1. Médias dos teores de lignina total, hemiceluloses, extrativos totais e extrativos em água fria e quente por tratamento

Tratamento	Lignina total (%)	Hemiceluloses (%)	Extrativos totais (%)	Água fria (%)	Água quente (%)
ENT	29,07 C	14,47 a	3,47 d	1,27 c	2,15 D
EMT	31,52 B	9,62 c	20,03 a	2,53 b	3,55 C
TNT	31,31 B	12,42 b	8,06 c	4,80 a	4,35 B
TMT	34,10 A	2,99 d	15,30 b	5,86 a	5,94 A
Teste de Cochran	3,37*	0,68 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,47*
Teste F	–	303,16*	929,97*	53,83*	–
Teste H	16,14*	–	–	–	17,86*

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula ou minúscula na coluna, não diferem significativamente em nível de 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste H ou teste de Tukey. n.s.: não significativo em nível de 5% ($P > 0,05$). *: significativo em nível de 5% ($P < 0,05$). ENT: *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT: *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT: *Tectona grandis* não tratada; TMT: *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C.

5.1.1 Lignina total

O teor de lignina total correspondeu à soma dos teores de lignina solúvel e insolúvel. O *Eucalyptus grandis* não tratado teve a menor média de teor de lignina total dentre os tratamentos, porém, essa média foi maior que a reportada em outros trabalhos

para a espécie (BATISTA et al., 2016; BELLON, 2013). A média do teor de lignina total da *Tectona grandis* não tratada encontra-se dentro do reportado na literatura (BELLON, 2013).

Para ambas as espécies, o processo de modificação térmica a 160 °C aumentou significativamente a proporção de lignina total, em que a maior média foi da teca (34,10%). Comparando-se as espécies entre si, em ambas as condições (não tratada e modificada termicamente), as médias de teor de lignina total da madeira de *Tectona grandis* foram maiores que as do *Eucalyptus grandis*, mesmo comportamento mencionado por Belon (2013) para essas espécies.

O aumento no teor de lignina proporcionado pelo processo de modificação térmica não foi real, mas sim, aparente. Isso significa que não foi formada mais lignina na parede celular, mas sim, a proporção desta aumentou em resposta à perda de massa, principalmente de hemiceluloses, que ocorre de forma significativa a partir de 140 °C (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006; ESTEVES et al., 2011).

Outros autores também reportaram aumento aparente no teor de lignina para a madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* (BATISTA et al., 2016; BELLON, 2013; LENGOWSKI, 2011; MOURA et al., 2012) e *Tectona grandis* (BELLON, 2013; LENGOWSKI, 2011). Ou seja, esse fenômeno é recorrente em madeiras modificadas termicamente.

5.1.2 Hemiceluloses

As médias do teor de hemiceluloses de todos os tratamentos diferiram significativamente entre si, em que as maiores médias foram da madeira não tratada de ambas as espécies, iguais a 14,47% e 12,42%, respectivamente para *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*. O efeito do processo de modificação térmica em ambas as espécies causou redução significativa no teor de hemiceluloses, efeito contrário ao do teor de lignina total.

As hemiceluloses de *Tectona grandis* foram mais susceptíveis à degradação térmica a 160 °C que as do *Eucalyptus grandis*, sendo reduzidas em cerca de 9,4 pontos percentuais (p.p.) para a primeira e em 4,9 p.p. para a segunda espécie.

Ao contrário do teor de lignina, as médias de hemiceluloses da madeira de *Eucalyptus grandis* foram maiores que as da *Tectona grandis* em ambas as condições avaliadas, mesmo comportamento reportado por Bellon (2013) e Lengowski (2011) para

o teor de holocelulose. Esse efeito era esperado porque o aumento aparente do teor de lignina é decorrente principalmente da perda de massa de hemiceluloses.

Esta perda de massa é um fenômeno amplamente relatado na literatura (BATISTA et al., 2016; ESTEVES; PEREIRA, 2009; GATTO et al., 2008; GONÇALEZ et al., 2016). As hemiceluloses são os componentes termicamente mais frágeis da parede celular, por causa da baixa massa molecular e estruturas amorfas, ocorrendo degradações significativas a partir de 140 °C (ESTEVES; PEREIRA, 2009). Até certos níveis, a degradação das hemiceluloses pode trazer benefícios às propriedades da madeira, como o aumento da estabilidade dimensional.

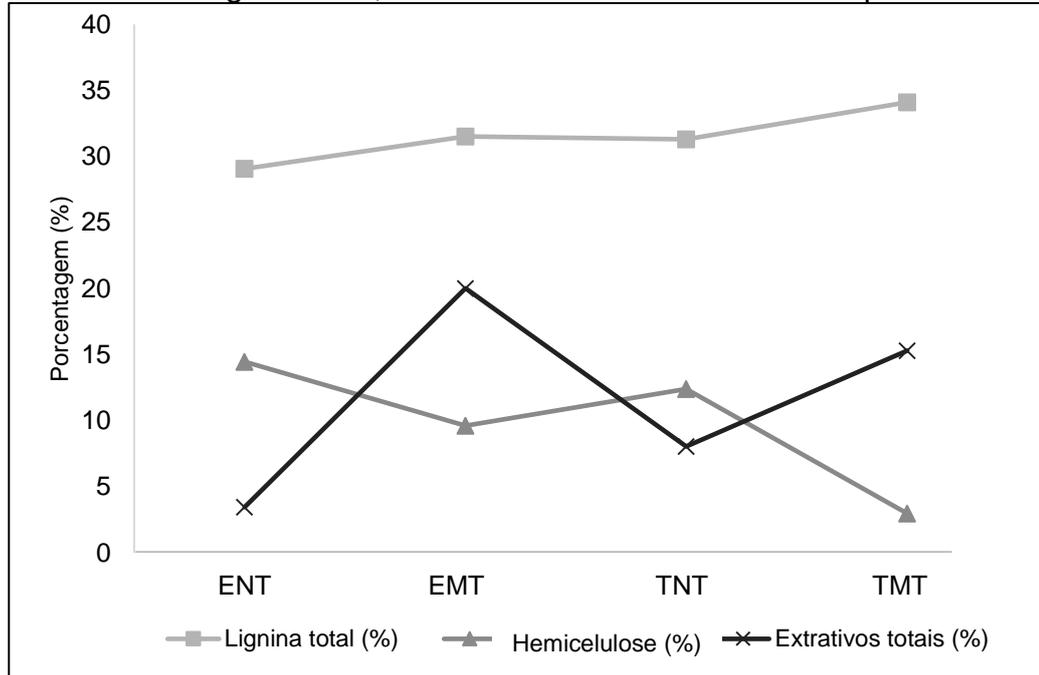
5.1.3 Extrativos totais

A média do teor de extrativos totais da madeira não tratada de *Eucalyptus grandis* está no intervalo mencionado na literatura para a espécie (BATISTA et al., 2016; GOMIDE et al., 2005; LENGOWSKI, 2011) e o mesmo foi verificado para a madeira não tratada de *Tectona grandis* (FLÓREZ et al., 2014; HAUPT et al., 2003; MIRANDA; SOUZA; PEREIRA, 2011).

Da mesma forma que o teor de hemiceluloses, as médias dos extrativos totais de todos os tratamentos diferiram entre si. Analisando-se os resultados da madeira não tratada, a média do teor de extrativos totais da *Tectona grandis* foi 4,6 p.p. superior a de *Eucalyptus grandis*, ao passo que para a madeira modificada termicamente o efeito foi o contrário, em que o teor de extrativos totais desta espécie foi 4,7 p.p. maior que o daquela. Esse comportamento foi o mesmo indicado por Belon (2013) para as mesmas espécies e condições analisadas (processo e temperatura).

Na Figura 5 encontram-se as linhas de tendência dos componentes químicos analisados. Nota-se que os teores de lignina total e hemiceluloses foram contrastantes em todos os tratamentos, ou seja, a redução do teor de hemiceluloses resultou em aumento aparente do teor de lignina total da madeira modificada termicamente de ambas as espécies.

Maiores acréscimos no teor de extrativos totais foram verificados para a madeira de *Eucalyptus grandis* (5,8 vezes) em comparação com a *Tectona grandis* (1,9 vezes). Este resultado deve-se ao fato de ter ocorrido a redução das hemiceluloses e conseqüentemente o aumento aparente de lignina na parede celular da madeira modificada termicamente a 160 °C.

Figura 5. Teores de lignina total, hemiceluloses e extrativos totais por tratamento

Fonte: A autora.

O mesmo padrão contrastante foi verificado entre os teores de hemiceluloses e extrativos totais, indicando que compostos derivados da degradação das hemiceluloses foram contabilizados como extrativos (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

5.1.4 Extrativos em água fria e água quente

Os teores de extrativos em água fria e água quente das madeiras de *Eucalyptus grandis* (BATISTA et al., 2016; CRUZ et al., 2006) e *Tectona grandis* (BROCCO, 2014; FERREIRA et al. 2015) encontram-se dentro do intervalo reportado na literatura.

Apesar de não ter sido objetivo do trabalho realizar esse tipo de comparação, ressalta-se que a água quente solubiliza mais extrativos do que a água fria, pois a temperatura é um catalisador de reação química, aumentando a eficiência de extração em termos de quantidade (polissacarídeos, especialmente carboidratos). Qualitativamente, os compostos químicos extraídos nos dois métodos são quase os mesmos, o que muda é a sua quantidade (CRUZ et al., 2006; TAPPI, 1997).

Essa tendência foi verificada para os dois tratamentos com madeira de *Eucalyptus grandis*, ao passo que para a madeira não tratada de *Tectona grandis* a fração extraída em água fria foi 0,45 p.p. superior (em termos absolutos) que a fração extraída em água

quente. Para a madeira modificada termicamente, a diferença absoluta foi pequena (0,08 p.p.) entre água fria e água quente. Este resultado pode ter sido motivado pelos diferentes fatores que influenciam na heterogeneidade da composição química da madeira.

Os compostos extraídos com água fria são açúcares, corantes, gomas e taninos (pequenas frações). Com água quente, além dessas substâncias, também são extraídos os amidos, hemiceluloses, substâncias fenólicas (maiores frações) e minerais (OLIVEIRA et al., 2005).

Para ambas condições (madeira não tratada e modificada termicamente) e solventes (água fria e água quente), a madeira de *Tectona grandis* teve maiores médias de teor de extrativos que a de *Eucalyptus grandis*, mesmo comportamento do teor de extrativos totais para a madeira não tratada. O acréscimo da média absoluta dos extrativos totais do *Eucalyptus grandis*, pode ter sido ocasionado pela derivação das hemiceluloses em compostos extraíveis, que aumentou o percentual de extrativos. Este comportamento também foi reportado por Belon (2013) e Lengowski (2011) para as mesmas espécies e condições analisadas.

De modo geral, a madeira modificada termicamente de ambas as espécies teve maior fração extraída em água que a madeira não tratada, mesmo comportamento dos extrativos totais. Considerando que é importante compreender o tipo e a quantidade de extrativos presentes em cada espécie e a sua solubilidade, buscou-se realizar as extrações com diferentes solventes, com o propósito de responder a essas lacunas, verificando assim, a capacidade extratora de cada um com vistas a trabalhos futuros no tema de identificação por cromatografia gasosa (Tabela 2).

Conforme o teste F, houve interação significativa entre os três fatores analisados conjuntamente. Para todos os tratamentos, maiores médias de teor de extrativos foram verificadas com o uso de etanol-tolueno (2:1), seguido por acetona, diclorometano e clorofórmio. Os dois últimos, que são solventes apolares, tiveram comportamento extrator semelhante, diferindo estatisticamente apenas para o *Eucalyptus grandis* modificado termicamente.

O resultado verificado para o etanol-tolueno está de acordo com o relatado por Cruz et al. (2006) para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* (CRUZ et al., 2006). No entanto, em um trabalho com madeira juvenil de *Eucalyptus grandis*, a fração extraída em acetona foi maior que a em etanol-tolueno (BARBOSA et al., 2005). Há consenso na literatura que o teor de extrativos de *Eucalyptus* sp. e *Tectona grandis* é maior quando se

utilizam solventes polares, tais como a acetona e o etanol-tolueno (BARBOSA et al., 2005; HAUPT et al., 2003).

Tabela 2. Teor de extrativos: resultados da interação entre os fatores solvente (quatro níveis), espécie (dois níveis) e processo (dois níveis) por tratamento

Solventes	Tratamento: Espécie x Processo			
	ENT	EMT	TNT	TMT
Acetona	1,68 bC	11,46 bA	4,94 bB	12,99 bA
Etanol-tolueno	2,63 aD	19,20 aA	6,07 aC	14,48 aB
Clorofórmio	0,49 cC	3,07 dB	3,31 cB	5,95 cA
Diclorometano	0,61 cD	3,79 cB	3,11 cC	5,72 cA
Teste de Cochran		1,46 ^{ns}		
Teste F – Solventes		2667,99*		
Teste F – Espécie		413,58*		
Teste F – Processo		9551,41*		
Teste F – Interação AxBxC		173,17*		

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas colunas ou maiúscula nas linhas, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey ($P > 0,05$). ENT: *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT: *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT: *Tectona grandis* não tratada; TMT: *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C.

O diclorometano e o clorofórmio, além da baixa capacidade extratora, são difíceis de manusear durante as análises químicas, porque são mais voláteis. Além disso, oferecem maiores riscos de poluição ambiental e à saúde humana (POLETTI et al., 2012; TAPPI, 1997). Por isso, são encontrados menos estudos com esses solventes do que com acetona e etanol-tolueno. Entretanto, ainda assim, Gomide et al. (2005) afirmam que o diclorometano, em alguns casos, pode ser mais vantajoso por extrair apenas compostos lipofílicos da madeira, enquanto Moreira et al. (2016) afirmam que o mesmo é um bom indicador de qualidade da madeira.

Durante a realização da extração com diclorometano, o solvente se volatilizou rapidamente a 60 °C, e em razão disso a análise precisou ser repetida para os tratamentos do *Eucalyptus grandis*. Ainda, o rápido aquecimento do solvente causou agitação no material em análise no interior dos cadinhos, causando perda do mesmo.

Os diversos constituintes da madeira possuem natureza própria e são extraídos por solventes específicos (CRUZ et al., 2006). A acetona e o etanol-tolueno (polares) extraem ácidos e ésteres graxos, carboidratos e alguns compostos fenólicos, enquanto o clorofórmio e diclorometano (apolares) extraem praticamente os mesmos compostos,

sendo eles, ácidos e ésteres graxos, álcoois de cadeia longa e esteróides (GOMIDE et al., 2005; SILVERSTEIN et al., 2002).

O comportamento dos solventes na madeira não tratada seguiu um padrão, em que a *Tectona grandis* teve maiores médias que o *Eucalyptus grandis* e todas diferiram estatisticamente. Nas madeiras modificadas termicamente, o comportamento foi o mesmo apenas para os solventes apolares. Para a acetona, não houve diferença significativa entre as espécies. Para o etanol-tolueno, a média do *Eucalyptus grandis* foi superior a da *Tectona grandis*, mesmo comportamento verificado para o teor de extrativos totais (Tabela 1).

Na literatura é mencionado que é possível extrair em torno de 60 a 70 compostos da madeira do gênero *Eucalyptus*, em que os majoritários são os ácidos graxos e esteróis (β -sitosterol), compostos aromáticos polares e carboidratos (CRUZ et al., 2006; BARBOSA et al., 2005). Para a *Tectona grandis*, os compostos mais citados são as quinonas, tectoquinonas e β -sitosterol (HAUPT et al., 2003).

5.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

Tabela 3. Médias de densidade aparente (12%), umidade de equilíbrio (12%) e inchamento total

Tratamento	Densidade aparente (g cm ⁻³)	Umidade de equilíbrio (%)	Inchamento total (%)		
			Radial	Tangencial	Volumétrico
ENT	0,476 b	8,82 c	4,12 a	8,79 a	13,25 a
EMT	0,443 b	5,72 d	2,52 c	6,07 b	8,87 b
TNT	0,589 a	11,47 a	3,28 b	4,63 c	8,46 b
TMT	0,476 b	9,98 b	1,98 c	3,67 c	6,02 c
Teste de Cochran	1,04 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,64 ^{ns}
Teste F	29,01*	219,16*	22,81*	54,75*	44,33*

Médias seguidas de uma mesma letra na coluna, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey ($P > 0,05$). *: significativo ($P < 0,05$). ENT: *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT: *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT: *Tectona grandis* não tratada; TMT: *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C.

De acordo com o teste de Cochran, as variâncias dos tratamentos foram homogêneas ($P > 0,05$) e aplicou-se a ANOVA. Conforme o teste F, para cada

propriedade avaliada, pelo menos uma média dos tratamentos foi diferente das demais ($P < 0,05$) e aplicou-se o teste de Tukey para a diferenciação das médias (Tabela 3).

5.2.1 Densidade aparente a 12%

A densidade aparente do *Eucalyptus grandis* não tratado foi inferior ao reportado na literatura (BATISTA, 2012; IPT, 1997 citado por IPT, 2017). Entretanto, outros autores citam densidades que variam de 0,45 a 0,55 g cm⁻³ para a madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* (BELLON, 2013) e de 0,59 a 0,82 g cm⁻³ para a *Tectona grandis* (FLORÉZ, et al., 2014). A densidade aparente da madeira não tratada de *Tectona grandis* foi significativamente maior que a de *Eucalyptus grandis*, o que era um resultado esperado, conforme reportado por Lengowski (2011).

O efeito do processo de modificação térmica a 160 °C foi nulo para a madeira de *Eucalyptus grandis*, porém com redução de cerca de 7%. Por outro lado, a densidade aparente da madeira de *Tectona grandis* modificada termicamente foi reduzida significativamente em 19%. Este padrão é comumente verificado na literatura, em que alguns autores reportaram reduções de 6% a 19% para a madeira de *Eucalyptus grandis* (BATISTA et al., 2011; CALONEGO, 2009) e de 4% a 9% para *Tectona grandis* (BELLON, 2013; LENGOWSKI, 2011).

A redução na densidade aparente é decorrente da perda de massa dos constituintes da parede celular, podendo causar um efeito benéfico, pois possibilita a melhoria da estabilidade dimensional da madeira. A magnitude dessas alterações depende das condições do processo, em que a temperatura final é uma das variáveis mais importantes. Em suma, quanto maior a temperatura de modificação térmica, maior será a redução da densidade (BAL; BEKTAS, 2012; BRITO et al., 2006; LOPES et al., 2014).

5.2.2 Umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio do ambiente nas condições testadas (25 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa) era de aproximadamente 12%, e esperava-se que a madeira não tratada de ambas espécies atingisse umidade de equilíbrio com o ambiente a um teor de umidade próximo a esse. Isso foi verificado para a madeira de *Tectona grandis* (11,7%), que teve média maior que a madeira de *Eucalyptus grandis* (8,82%).

Esperava-se que a umidade de equilíbrio da madeira não tratada de *Tectona grandis* fosse menor, por causa da maior quantidade de extrativos totais (Tabela 1), que diminuem a higroscopicidade da madeira (TSOUMIS, 1991). Ainda, a umidade de equilíbrio da madeira não tratada de *Eucalyptus grandis* foi cerca de 3,20 p.p. inferior a umidade de equilíbrio do ambiente.

Como o material foi coletado na empresa, na forma serrada, não houve controle do histórico de exposição da madeira desde a colheita. Dessa forma, deve haver um efeito da histerese contribuindo para a redução da higroscopicidade da madeira (GLASS; ZELINKA, 2010) de *Eucalyptus grandis* em comparação com a madeira de *Tectona grandis*. Outro fator que não se pode desprezar é a heterogeneidade do material.

O processo de modificação térmica reduziu significativamente a higroscopicidade da madeira de ambas as espécies, decorrente da significativa perda de massa de hemiceluloses causada pelo processo (Tabela 1). As hemiceluloses são os componentes mais higroscópicos da parede celular e o processo de modificação térmica causa a perda de massa desses componentes o que acarreta na redução dos sítios hidroxílicos, e assim de ligação da água higroscópica na madeira (ESTEVES; PEREIRA, 2009; HILL, 2006).

A umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* foi mais afetada pelo processo, com redução de 35% ou 3,10 p.p. em comparação à madeira não tratada, ao passo que na madeira de *Tectona grandis* a redução foi de 13% ou 1,49 p.p. Conforme dados da Tabela 1, esperava-se um efeito contrário, porque o teor de hemiceluloses da madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* foi maior que o da madeira de *Tectona grandis*. Por outro lado, o efeito foi inverso para o teor de extrativos totais. Assim, as alterações causadas pelo processo na composição química da madeira podem ser complexas, incluindo o rearranjo molecular de compostos (ESTEVES; PEREIRA, 2009), impedindo, nesse caso, a verificação de uma relação objetiva entre causa e efeito.

Outros autores relataram a mesma tendência de reduções mais significativas da umidade de equilíbrio a 12% na espécie *Eucalyptus grandis*, ao estudarem o efeito da modificação térmica. Os decréscimos variaram de 3 p.p. a 13,1 p.p. para o *Eucalyptus grandis* (BATISTA, 2012; BELLON, 2013; CALONEGO, 2009; MODES, 2010) e 2,6 a 6,4 p.p. para *Tectona grandis* (BELLON, 2013; LENGOWSKI, 2011).

5.2.3 Inchamento total

As médias de inchamento total da madeira não tratada de *Eucalyptus grandis* encontram-se dentro do mencionado na literatura, sendo ora menores (CALONEGO et al., 2014), ora maiores (BATISTA, 2012; MODES, 2010; OLIVEIRA; SILVA, 2003). Para a madeira não tratada de *Tectona grandis*, as médias foram superiores ao relatado por Bellon (2013) e Motta (2011).

Para uma mesma condição (madeira não tratada e modificada termicamente), a madeira de *Tectona grandis* foi significativamente mais estável dimensionalmente que a de eucalipto. Apenas para o inchamento radial não houve diferença significativa entre as médias de ambas espécies para madeira modificada termicamente, mas a média absoluta de *Tectona grandis* foi menor.

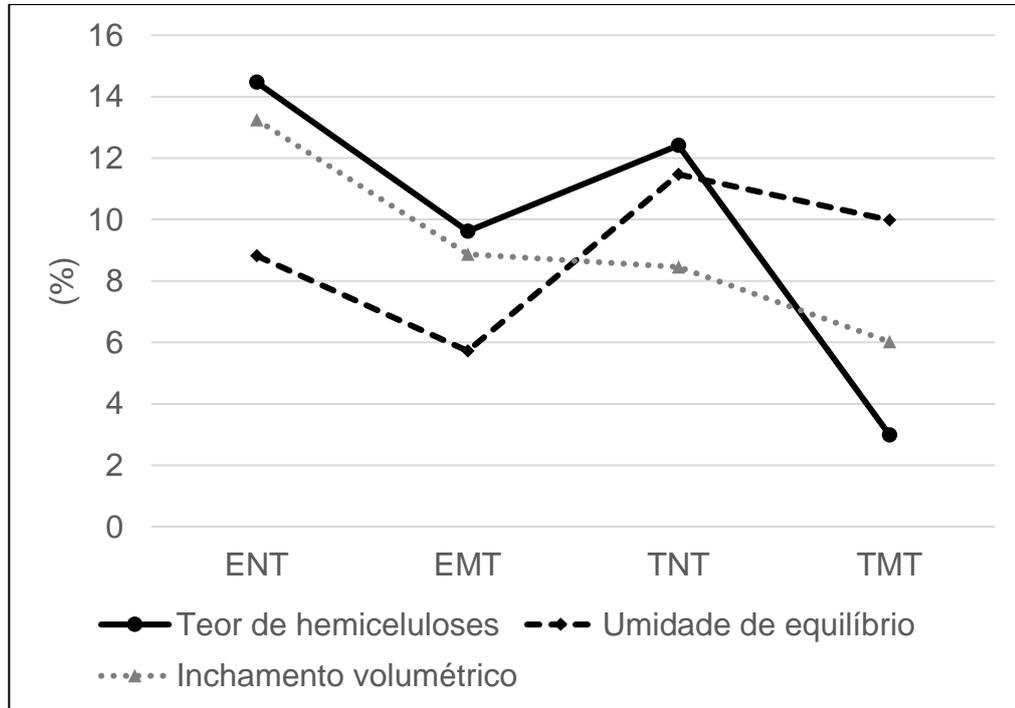
O efeito do processo de modificação térmica a 160 °C foi significativo na redução do inchamento total da madeira de ambas as espécies. Apenas para o inchamento tangencial da madeira de *Tectona grandis* o efeito foi nulo, porém, a média absoluta da madeira modificada termicamente foi menor que da madeira não tratada.

Para o inchamento volumétrico total, o efeito foi maior na madeira de *Eucalyptus grandis*, com redução de 33% ou 4,38 p.p., ao passo que para a *Tectona grandis* a redução foi de 29% ou 2,44 p.p. Conforme discutido e reportado na literatura, a madeira de *Tectona grandis* é naturalmente mais estável dimensionalmente (BELLON, 2013; IPT/SCTDE, 1997 citado por IPT, 2017; LENGOWSKI, 2011) e, por isso, o efeito da modificação térmica foi menor que o do *Eucalyptus grandis*, reconhecidamente de baixa estabilidade dimensional.

Na Figura 6 encontram-se as linhas de tendência do teor de hemiceluloses, umidade de equilíbrio e inchamento volumétrico. Conforme discutido anteriormente, o processo de modificação térmica causou a degradação das hemiceluloses de ambas as espécies, refletindo na conseqüente redução da umidade de equilíbrio (higroscopicidade), o que também pode ser visto na Figura 6.

A redução da higroscopicidade é um dos efeitos mais benéficos do processo nas propriedades da madeira. Isso porque a madeira torna-se mais estável dimensionalmente, o que pode ser verificado na Figura 6 pela concomitante redução do inchamento volumétrico.

Figura 6. Teor de hemiceluloses, umidade de equilíbrio e inchamento volumétrico total de acordo o tratamento – ENT: *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT: *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT: *Tectona grandis* não tratada; TMT: *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C



Fonte: A autora.

5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Na Tabela 4 encontram-se os resultados dos ensaios de propriedades mecânicas. De acordo o teste de Cochran, as variâncias dos tratamentos foram homogêneas ($P > 0,05$) para as médias de compressão paralela às fibras e para o módulo de elasticidade (MOE) da flexão estática, o que possibilitou a aplicação da ANOVA. De acordo com o teste F, pelo menos uma média dos tratamentos foi diferente das demais ($P < 0,05$) para esses ensaios, então aplicou-se o teste de Tukey para a diferenciação das médias.

De acordo com o teste de Cochran, as variâncias dos tratamentos não foram homogêneas ($P < 0,05$) para para o módulo de ruptura (MOR) e, neste caso, o teste H mostrou que pelo menos uma das médias foi estatisticamente diferente das demais.

Tabela 4. Resultados de compressão paralela às fibras e dos módulo ruptura (MOR) e elasticidade (MOE) na flexão estática por tratamento

Tratamento	Flexão estática (MPa)				Compressão paralela às fibras (MPa)	Redução (%)
	MOR	Redução (%)	MOE	Redução (%)		
ENT	79 B	–	10930 a	–	53 a	–
EMT	46 D	42	8111 b	26	37 b	30
TNT	94 A	–	10123 a	–	41 b	–
TMT	56 C	40	7860 b	22	22 c	46
Teste de Cochran	0,42*		0,51 ^{ns}	–	0,57 ^{ns}	–
Teste F	–		14,79*	–	64,47*	–
Teste H	38,26*		–	–	–	–

Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula ou minúscula na coluna, não diferem significativamente em nível de 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste H de Kruskal-Wallis ou teste de Tukey. n.s.: não significativo ($P > 0,05$). *: significativo ($P < 0,05$). ENT: *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT: *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT: *Tectona grandis* não tratada; TMT: *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C.

5.3.1 Flexão estática

Os resultados de MOR e MOE na flexão estática para *Eucalyptus grandis* não tratado estão próximos aos de outras pesquisas (ARAÚJO et al., 2012; CALONEGO, 2009; GONÇALEZ et al., 2006) e o mesmo foi verificado para a madeira não tratada de *Tectona grandis* (IPT/SCTDE, 1997 citado por IPT, 2017; MOTTA; ALVES; PAES, 2013). A madeira não tratada de *Eucalyptus grandis* teve menor média de MOR, em comparação a *Tectona grandis*, e o mesmo foi verificado ao se compararem as médias da madeira modificada termicamente de ambas as espécies. Por outro lado, não houve diferença significativa entre as médias do MOE das espécies para ambas as condições avaliadas (madeira não tratada e modificada termicamente).

O efeito da modificação térmica foi significativo na redução da resistência à flexão estática das espécies, havendo um padrão similar para ambas, porém, com tendência a maiores perdas para a madeira de eucalipto. Cademartori (2012) e Calonego (2009) obtiveram resultados semelhantes ao presente estudo, ao observarem alterações significativas no MOR e MOE de flexão estática para a madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente. Por outro lado, para o MOR e MOE da *Tectona grandis*, os

valores reportados na literatura foram ora maiores (BHAT; PRIYA, 2004; FLORÉZ et al., 2014) e ora menores (MIRANDA; SOUZA; PEREIRA, 2011).

Conforme os dados da Tabela 4, o MOR foi mais afetado pelo processo de modificação térmica que o MOE. Isso significa que a madeira modificada termicamente teve maior perda na sua capacidade de resistir ao carregamento antes de falhar (ruptura) do que na sua rigidez, ou seja, a capacidade de resistir a carga sem deformar. De acordo com Esteves e Pereira (2009), esse padrão ocorre porque o MOR é mais influenciado pela perda de massa de hemiceluloses, que são mais degradadas no processo de modificação térmica, ao passo que o MOE é mais influenciado pela lignina e celulose, que são menos degradadas.

5.3.2 Compressão paralela às fibras

Comparando-se a resistência à compressão paralela às fibras das madeiras não tratadas de *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* com outros dados da literatura, a média do *Eucalyptus grandis* foi ora maior (IPT, 1989 citado por IPT, 2017; MODES, 2010) e ora menor (BATISTA, 2012; CALONEGO, 2009) e a média da *Tectona grandis* também foi ora maior (FLORÉZ et al., 2014; IPT/SCTDE, 1997 citado por IPT, 2017; PAES et al., 2015) e ora menor (MOTTA, 2011).

Para ambas as condições avaliadas (madeira não tratada e modificada termicamente), as médias de *Eucalyptus grandis* foram superiores as de *Tectona grandis*. Este efeito foi oposto ao verificado para o MOR na flexão estática.

O efeito da modificação térmica a 160 °C foi significativo na redução da compressão paralela às fibras em ambas as espécies, do mesmo modo que na flexão estática. Para *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* os descréscimos foram de 30% e 46%, respectivamente. Para o *Eucalyptus grandis*, este resultado está de acordo ao relatado na literatura (BATISTA, 2012; CALONEGO, 2009; MODES, 2010, SERPA et al., 2003), ao passo que para *Tectona grandis* a redução foi superior aos reportado por Bellon et al. (2014).

Um dos efeitos negativos do processo de modificação térmica é a redução da resistência mecânica da madeira, o que foi verificado para ambas as espécies. Esse efeito está relacionado com a perda de massa (principalmente de hemiceluloses, Tabela 1), que causou alteração da composição química da parede celular, refletindo também em redução da densidade aparente (Tabela 3).

5.4 ENSAIOS DE BIODETERIORAÇÃO

5.4.1 Fungos apodrecedores

Os fungos xilófagos empregados e a perda de massa (%) das madeiras utilizadas durante o ensaio de apodrecimento acelerado constam da Tabela 5. De acordo com o teste de Cochran, as variâncias dos tratamentos foram homogêneas ($P > 0,05$), o que possibilitou a aplicação da ANOVA. Conforme o teste F, houve interação significativa entre todos os fatores testados ($P < 0,05$).

Tabela 5. Resultados das perdas de massa (%) dos fungos de podridão parda e branca por tratamento

Fungo	Espécie x processo			
	ENT	EMT	TNT	TMT
<i>Postia placenta</i>	42,29 aA	45,14 aA	11,60 aC	23,39 aB
<i>Trametes versicolor</i>	16,54 bB	22,69 bA	7,77 aC	9,41 bC
Teste de Cochran				11,08 ^{ns}
Teste F – Fungo (A)				145,86*
Teste F – Espécie (B)				185,73*
Teste F – Processo (C)				16,87*
Teste F – Interação AxBxC				6,06*

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas colunas ou maiúscula nas linhas, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey ($P > 0,05$). n.s.: não significativo ($P > 0,05$). *: significativo ($P < 0,05$). ENT: *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT: *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT: *Tectona grandis* não tratada; TMT: *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C.

De modo geral, o fungo de podridão parda *Postia placenta* degradou mais a madeira para todos os tratamentos. Apenas para a *Tectona grandis* não tratada não houve diferença significativa entre os fungos testados, mas mesmo assim, a maior média absoluta de perda de massa (11,60%) foi verificada para o *Postia placenta*. Batista (2012) também relatou maior degradação da madeira de *Eucalyptus grandis* (não tratada e modificada termicamente) causada por *Postia placenta* do que por *Gloeophyllum trabeum* (podridão parda).

Para ambos os fungos e condições testadas (madeira não tratada e madeira modificada termicamente), a madeira de *Eucalyptus grandis* teve menor resistência à

biodeterioração que a madeira de *Tectona grandis*. Pelo critério da perda de massa (Quadro 3), a madeira de *Eucalyptus grandis* foi classificada como “moderadamente resistente” e “não resistente” ao fungo *Postia placenta*, respectivamente para madeira não tratada e modificada termicamente; para ambas as condições, foi classificada como “resistente” ao fungo *Trametes versicolor*.

A madeira de *Tectona grandis* foi classificada da mesma forma para ambas as condições (madeira não tratada e modificada termicamente): “resistente” e “altamente resistente”, respectivamente para *Postia placenta* e *Trametes versicolor*. Paes et al. (2007) também classificaram a madeira de *Tectona grandis* como “resistente” ao ataque dos fungos apodrecedores *Postia placenta* e *Polyporus fumosus* (podridão branca).

Conforme informações da literatura (CLAUSEN, 2010; TSOUMIS, 1991), espécies com maiores teores de lignina e extrativos totais têm maior resistência à biodeterioração por organismos xilófagos. Conforme os dados da Tabela 1, a madeira não tratada de *Tectona grandis* teve maiores teores de lignina e extrativos totais que a de *Eucalyptus grandis*, o que já indicava maior resistência à biodeterioração para aquela espécie. Apesar do teor de extrativos totais da madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* ter sido maior que da *Tectona grandis* (não tratada e modificada termicamente), não foi verificado benefício na ação fungicida, conforme discutido anteriormente.

A alteração da composição química da parede celular causada pelo processo de modificação térmica não resultou em efeito positivo na resistência da madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*. Nas melhores situações, o efeito foi nulo.

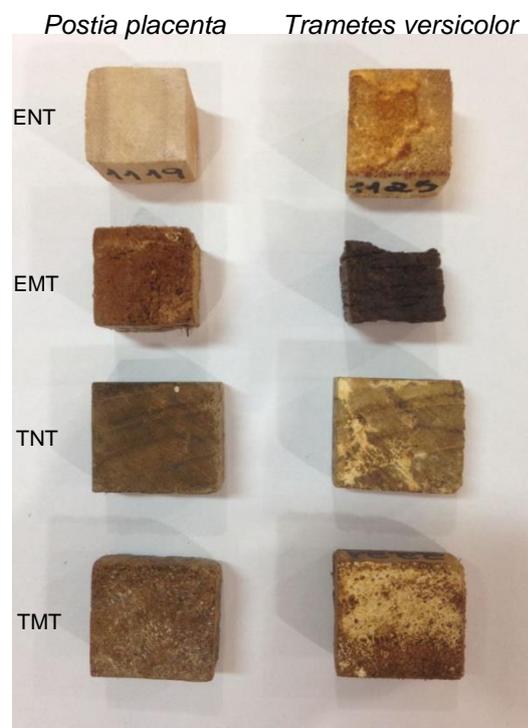
Para o *Eucalyptus grandis*, o efeito do processo foi nulo na resistência à degradação causada por *Postia placenta*. Para o mesmo processo e temperatura, também já foi reportado efeito nulo da biodeterioração causada por *Postia placenta* em madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* (BATISTA, 2012). Em outro trabalho com *Eucalyptus grandis* exposto ao fungo de podridão parda *Gloeophyllum trabeum*, a resistência da madeira modificada termicamente foi menor que da madeira não tratada (MODES, 2009).

O mesmo efeito ocorreu na madeira de *Tectona grandis* exposta ao fungo *Trametes versicolor*. Este padrão já havia sido reportado por Bellon (2013) para a madeira modificada termicamente de *Tectona grandis* pelo mesmo processo e temperatura, porém para fungos de podridão branca de outras espécies (*Lentinula edodes* e *Pleurotus djamor*).

Analisando-se a degradação causada por *Trametes versicolor* na madeira de *Eucalyptus grandis*, o efeito do processo foi negativo, ou seja, a madeira modificada termicamente teve menor resistência à biodeterioração que a madeira não tratada. Modes (2010) também reportou efeito negativo utilizando-se as mesmas espécies de madeira e fungo, porém em um processo diferente de modificação térmica.

O processo também teve efeito negativo na resistência à biodeterioração da madeira de *Tectona grandis* exposta ao fungo *Postia placenta*. Na Figura 7 encontram-se os corpos de prova após o término do ensaio com os fungos apodrecedores.

Figura 7. Aspecto físico dos corpos de prova após 12 semanas de deterioração fúngica



Fonte: A autora.

Nota-se na Figura 7 pouca alteração na forma e aspecto dos corpos de prova não tratados, indicando menor deterioração pelos fungos. Para a madeira modificada termicamente a 160 °C, a deterioração causada por *Postia placenta* foi mais severa, causando leves rachaduras. O aspecto deteriorado do corpo de prova de *Eucalyptus grandis* modificado termicamente, causado pelo fungo *Trametes versicolor*, se destaca pela sua geometria deformada.

5.4.2 Térmitas subterrâneas

Na Tabela 6 encontram-se as médias de perda de massa, notas de desgaste e mortalidade do ensaio de deterioração por térmitas subterrâneas (*Nasutitermes corniger*), por tratamento.

Tabela 6. Resultados dos ensaios de deterioração por térmitas subterrâneas *Nasutitermes corniger*

Tratamento	Perda de massa (%)	Notas de desgaste	Mortalidade (%)
ENT	8,29 A (11)	5 C	91 (alta)
EMT	6,67 B (10)	7 B	93,7 (alta)
TNT	4,87 C (13)	7 B	100 (total)
TMT	2,92 D (21)	9 A	100 (total)
<i>Pinus sp.</i>	2,09 D (18)	10 A	100 (total)
Teste de Cochran	4,11*	–	–
Teste F	–	–	–
Teste H	42,52*	21,49*	–

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula não diferem significativamente em nível de 5% de probabilidade, pelo teste H de Kruskal-Wallis. *: significativo ($P < 0,05$). ENT: *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT: *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT: *Tectona grandis* não tratada; TMT: *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C.

De acordo com o teste de Cochran, as variâncias não foram homogêneas entre os tratamentos para a análise de perda de massa ($P < 0,05$). Desse modo, foi utilizado o teste H (não paramétrico), que indicou que houve diferença significativa ($P < 0,05$) entre os tratamentos. A decisão estatística do teste H para as notas de desgaste foi a mesma da análise de perda de massa. Em alguns casos as térmitas subterrâneas fizeram túneis na areia, especialmente naqueles em quem as amostras não foram modificadas termicamente, indicando o vigor dos insetos utilizados.

A madeira juvenil não tratada de *Eucalyptus grandis* foi a mais atacada pelas térmitas subterrâneas, com maior perda de massa, aproximadamente quatro vezes maior que a do *Pinus sp.*, que é considerada de baixa resistência à biodeterioração e indicada como padrão de comparação para avaliar a resistência natural das madeiras ao ataque de térmitas xilófagas (ASTM, 2008d). O ataque de térmitas pode ser explicado pela baixa

presença de extrativos na madeira juvenil, conforme resultados da Tabela 1. Destaca-se que esse tratamento teve a pior nota de desgaste (5), representando um ataque intenso. A perda de massa da madeira não tratada de *Tectona grandis* foi 2,3 vezes superior a madeira de *Pinus* sp.

Para ambas as condições analisadas (madeira não tratada e modificada termicamente), a espécie *Tectona grandis* teve menor perda de massa e melhores notas de desgaste que a madeira de *Eucalyptus grandis*. Apenas nos tratamentos com *Eucalyptus grandis* houve insetos sobreviventes ao término do ensaio, com 91% e 94% de mortalidade, respectivamente para a madeira não tratada e modificada termicamente.

Para ambos os tratamentos com *Tectona grandis*, a mortalidade dos insetos também foi maior (100%) que os tratamentos com *Eucalyptus grandis*. Na literatura, a *Tectona grandis* é citada como resistente ao ataque de organismos xilófagos (PAES et al., 2007). Ressalta-se a importância do conteúdo de extrativos na durabilidade natural da madeira juvenil desta espécie, que está relacionada a quantidade de tectoquinona, substância de origem aromática que repele o ataque de insetos (HAUPT et al., 2003).

Para ambas as espécies, o processo de modificação térmica teve efeito positivo contra o ataque das térmitas subterrâneas. Comparando-se com a madeira juvenil não tratada, a perda de massa foi reduzida em 20% e em 40%, respectivamente para *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*. Da mesma forma, as notas de desgaste foram melhores para a madeira juvenil modificada termicamente.

A madeira de *Pinus* sp. (controle) teve a menor média absoluta de perda de massa e a melhor nota absoluta de desgaste, além de a mortalidade das térmitas ter sido igual a 100%. Apesar da madeira deste gênero ser considerada de baixa resistência a degradação por organismos xilófagos, resultado semelhante foi reportado na literatura para o mesmo ensaio (PAES et al., 2007b). Paes et al. (2007b) atribuíram esse fato à maior ocorrência das térmitas do gênero *Nasutitermes* em florestas de folhosas do que naquelas de *Pinus* sp., fazendo com que a madeira deste gênero seja incomum na dieta desses insetos. Supriana (1985) afirmou que as térmitas são insetos sensíveis à mudanças de dieta, o que reforça os resultados verificados para a madeira de *Pinus* sp.

Os resultados de perda de massa e notas de desgaste da madeira modificada termicamente de *Tectona grandis* não diferiram significativamente daqueles do *Pinus* sp. Em ambos, inclusive, a mortalidade foi igual a 100%. Isso reforça que o processo de modificação térmica teve um efeito positivo nesse tratamento. Não foram encontrados na

literatura trabalhos com madeira modificada termicamente de *Tectona grandis* submetida à deterioração por térmitas do gênero *Nasutitermes*.

5.4.3 Térmitas de madeira seca

Na Tabela 7 encontram-se as médias de perda de massa, notas de desgaste, número de orifícios e mortalidade do ensaio de deterioração por térmitas de madeira seca *Cryptotermes brevis*, por tratamento.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de deterioração por térmitas *Cryptotermes brevis*

Tratamento	Perda de massa (%)	Notas de desgaste	Orifícios	Mortalidade (%)
ENT	1,85 A	3 C	13	52,3 (moderada)
EMT	1,41 B	2 B	7	79,5 (alta)
TNT	0,67 C	2 B	9	67,5 (alta)
TMT	0,54 C	1 A	7	75,5 (alta)
<i>Pinus</i> sp.	0,18 D	1 A	0	100 (alta)
Teste de Cochran	0,34*	–	–	–
Teste F	–	–	–	–
Teste H	44,92*	21,20*	–	–

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula em uma coluna não diferem significativamente em nível de 5% de probabilidade, pelo teste H de Kruskal-Wallis. *: significativo ($P < 0,05$). ENT: *Eucalyptus grandis* não tratado; EMT: *Eucalyptus grandis* modificado termicamente a 160 °C; TNT: *Tectona grandis* não tratada; TMT: *Tectona grandis* modificada termicamente a 160 °C.

Foram considerados orifícios apenas aqueles que transpassaram os corpos de prova, conforme recomendação do IPT (1980). De acordo com o teste de Cochran, as variâncias não foram homogêneas entre os tratamentos ($P < 0,05$) para o ensaio de perda de massa, impossibilitando a ANOVA. Desse modo, foi utilizado o teste H (não paramétrico), que indicou que houve diferença significativa ($P < 0,05$) entre as médias dos tratamentos. A decisão estatística do teste H para as notas de desgaste foi a mesma da análise de perda de massa.

O *Eucalyptus grandis* não tratado teve a maior perda de massa, sendo classificado como de baixa durabilidade natural ao ataque das térmitas *Cryptotermes brevis*. Justificase o resultado, em razão da menor porcentagem de extrativos totais e da maior quantidade de hemiceluloses na madeira de *Eucalyptus grandis* (Tabela 1).

Para a *Tectona grandis* não tratada, a perda de massa foi aproximadamente três vezes menor que no *Eucalyptus grandis* na mesma condição. A madeira de *Pinus* sp. teve a menor perda de massa, 10 vezes menor que a média do *Eucalyptus grandis* não tratado e aproximadamente quatro vezes menor que a da *Tectona grandis*, na mesma condição. Este resultado não era esperado, visto que na literatura foram reportadas maiores perdas de massa para a madeira de *Pinus* sp. em comparação a *Tectona grandis* (BROCCO, 2014; SOUSA, 2016).

As térmitas de madeira seca não fizeram orifícios na madeira de *Pinus* sp., enquanto na madeira juvenil não tratada de *Eucalyptus grandis* houve o maior número (13 orifícios), ressaltando assim a restrição das térmitas em digerir a madeira de *Pinus* sp. Isto pode ser explicado pelo padrão diferente do forrageamento desta espécie, em que não conseguiram penetrar a madeira, entretanto, degradaram apenas a superfície dos corpos de prova, o que também foi relatado por Batista (2012).

A mortalidade das térmitas de madeira seca em contato com a madeira de *Pinus* sp. foi total, do mesmo modo ao ocorrido no ensaio com as de hábito subterrâneo, o que sugere que esta espécie madeireira não faz parte da dieta habitual das térmitas avaliadas (BATISTA, 2012), ou ainda, indicando a presença de alguma substância tóxica em concentrações suficientes para causar a mortalidade dos cupins (GONÇALVES et al., 2013). Em determinados frascos, algumas térmitas sobreviveram até o final do ensaio, inclusive nas amostras que foram submetidas ao processo de modificação térmica a 160 °C e, no entanto, causaram uma menor perda de massa, confirmando uma tendência de melhoria da resistência à biodeterioração das madeiras. Isto também confirma o vigor dos insetos utilizados na pesquisa.

Os dados apresentados do desgaste ocasionado nos tratamentos da madeira de *Eucalyptus grandis* diferiram estatisticamente entre si. O ataque foi mais acentuado na madeira não tratada (nota 3), com 13 orifícios, enquanto na madeira modificada termicamente o ataque foi moderado (nota 2), com sete orifícios.

Os índices de mortalidade das térmitas nos tratamentos do *Eucalyptus grandis* foram moderado e alto, respectivamente para a madeira não tratada e modificada termicamente. Como mencionado anteriormente, a presença de extrativos nas madeiras, inclusive nos tratamentos com modificação térmica, podem ter influenciado na mortalidade dos organismos xilófagos.

O desgaste provocado pelas térmitas nos tratamentos da *Tectona grandis* foi pouco expressivo, com desgaste superficial observado na madeira modificada termicamente

(nota 1), com sete perfurações e desgaste moderado para a madeira não tratada (nota 2), com nove perfurações.

6 CONCLUSÕES

Com relação ao efeito do processo de modificação térmica a 160 °C nas propriedades da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*:

- Houve aumento aparente do teor de lignina total, decorrente da perda de massa de hemiceluloses, principalmente.
- O teor de extrativos totais e em água quente aumentou em resposta à perda de massa de hemiceluloses. O mesmo efeito foi verificado para os extrativos em água fria, para a madeira de *Eucalyptus grandis* e, apenas em termos absolutos, para a *Tectona grandis*.
- Os solventes polares (etanol-tolueno e acetona) foram mais eficientes na extração que os apolares (diclorometano e clorofórmio), em que o etanol-tolueno teve a maior capacidade extratora, seguido pela acetona.
- Apenas para a madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* houve diferença significativa na capacidade extratora dos solventes diclorometano (maior média) e clorofórmio (menor média).
- A higroscopicidade foi reduzida, decorrente da perda de massa de hemiceluloses, o que refletiu na redução do inchamento volumétrico total.
- A densidade aparente (12%) da *Tectona grandis* foi reduzida, ao passo que para o *Eucalyptus grandis* esse efeito ocorreu apenas em termos absolutos.
- A resistência mecânica à flexão estática e à compressão paralela às fibras foi reduzida. Para a flexão estática, o módulo de ruptura foi mais afetado que o módulo de elasticidade.
- Não houve benefício na resistência da madeira à biodeterioração por fungos apodrecedores.
- Houve aumento na resistência à biodeterioração causada por *Nasutitermes corniger* (térmitas subterrâneas) e apenas para a madeira de *Eucalyptus grandis* exposta a *Cryptotermes brevis* (térmitas de madeira seca).

Para a comparação da madeira não tratada das espécies:

- A *Tectona grandis* teve maiores teores de lignina total e extrativos, porém menor teor de hemiceluloses que o *Eucalyptus grandis*.
- A *Tectona grandis* teve maior densidade e estabilidade dimensional que a madeira de *Eucalyptus grandis*. O *Eucalyptus grandis* foi menos higroscópico que a *Tectona grandis*, provavelmente por algum efeito da história de exposição da madeira coletada e não pela qualidade intrínseca do material.
- Para a resistência à flexão estática, a madeira *Tectona grandis* teve maior módulo de ruptura que a de *Eucalyptus grandis*, ao passo que para o módulo de elasticidade não houve diferença significativa entre as espécies. Por outro lado, o *Eucalyptus grandis* foi mais resistente à compressão paralela às fibras.
- A *Tectona grandis* teve maior durabilidade natural que o *Eucalyptus grandis* para os quatro organismos xilófagos testados.
- Com base nas propriedades avaliadas, a madeira juvenil de *Tectona grandis* apresentou maior qualidade que a madeira juvenil de *Eucalyptus grandis*.
- Analisando-se os prós e contras do processo, é mais recomendável a modificação térmica a 160 °C da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* do que da madeira juvenil de *Tectona grandis*.

7 REFERÊNCIAS

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-143**: standard test methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken, 2008a.

_____. **ASTM D-1413**: Wood preservatives by laboratory soil-block cultures. West Conshohocken, 2008b.

_____. **ASTM D-2017**: Accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. West Conshohocken, 2008c.

_____. **ASTM D-3345**: Laboratory evaluation of wood and other cellulosic materials for resistance to termites. West Conshohocken, 2008d.

ANDRADE, E. G. **Influência da termorreificação de amostras de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden nas propriedades físicas, dureza Janka e flexão estática**. 2011. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013.

ARAÚJO, S. O. et al. Propriedades de madeiras termorreificadas de *Eucalyptus grandis* e sp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 327-336, 2012.

BAL, B. C.; BEKTAS, I. The effects of heat treatment on the physical properties of juvenile wood and mature wood of *Eucalyptus grandis*. **BioResources**, Raleigh, v. 7, n. 4, p. 5117-5127, 2012.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J. Influência do tempo e temperatura de retificação térmica na umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 255-261, 2010.

BATISTA, D. C.; TOMASELLI, I.; KLITZKE, R. J. Efeito do tempo e temperatura de modificação térmica na redução do inchamento máximo da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 533-540, 2011.

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme®**. 2012. 339 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BATISTA et al. Microstructural aspects of thermally modified *Eucalyptus grandis* wood. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 17, n. 3, p. 525-532, 2015.

_____. Effect of the Brazilian thermal modification process on the chemical composition of *Eucalyptus grandis* juvenile wood. Part 1: cell wall polymers and extractives contents. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 18, n. 2, p. 6-18, 2016.

BARBOSA, L. C.; MALTHA, C. R. A.; CRUZ, M. P. Composição química de extrativos lipofílicos e polares de madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Ciência & Engenharia**, Uberlândia, n. 15, v. 2, p. 13-20, 2005.

BELLON, K. R. R. **Modificação térmica da madeira de três espécies de florestas plantadas pelo processo VAP Holzsysteme®**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BELLON, K. R. R. et al. The effect of the thermal modification temperature in the resistance to the parallel compression of fiber for *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* and *Tectona grandis* wood. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, West Jordan, v. 8, n. 18, p. 512-520, 2014.

BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 34, n. 6, p. 517-532, 2001.

BHAT, K. M.; PRIYA, P. B. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat region in India. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 25, n. 3, p. 273-282, Sept. 2004.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 64, n. 3, p. 204-211, 2006.

BOONSTRA, M. J. et al. Microstructural and physical aspects of heat treated wood. Part 1. Softwoods. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 8, n. 3, p. 193-208, 2006.

_____. Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 41, n. 1, p. 41-57, 2007.

BRITO, J. O. et al. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.

BRITO, J. O.; MOURA, L. F. Efeito da termorreificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 69-76, 2011.

BRITO, J. P. **Ação de cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis*) e de solo (*Nasutitermes corniger*) nas madeiras termorreificadas de *Pinus taeda* e de *Corymbia citriodora***. 2015. 104 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2015.

BROCCO, V. F. **Potencialidades dos extrativos do cerne da madeira de teca como preservativo natural e sua influência na cor de madeiras claras**. 2014. 87 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorreificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden**. 2009. 149 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2009.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BALLARIN, A. W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, n. 4, p. 453-460, 2012.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; LATORRACA, J. V. F. Effect of thermal modification on the physical properties of juvenile and mature woods of *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 1, n. 21, p. 108-113, 2014.

CHAGAS, S. F. et al. Propriedades da madeira de teca de diferentes idades e oriundas de desbaste. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 138-150, 2014.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. cap. 14.

CRUZ, M. P. et al. Caracterização química do “pitch” em indústria de celulose e papel de *Eucalyptus*. **Química Nova**, São Paulo, v. 3, n. 29, p. 1-8, 2006.

ESTEVEES, B. et al. Extractive composition and summative analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 62, n.3, p. 344-351, 2008.

ESTEVEES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, Raleigh, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.

FERREIRA, K. A. C. et al. Análise dos compostos acidentais na madeira de *Tectona grandis* L. f. **Biodiversidade**, Cuiabá, v. 14, n. 1, p. 105, 2015.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® handbook**. Helsinki, 2003.

FLORÉZ, J. B. et al. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 20, n.1, p. 11-20, 2014.

GATTO, D. A. et al. Características tecnológicas das madeiras de *Luehea divaricata*, *Carya illinoensis* e *Platanus x acerifolia* quando submetidas ao vergamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 121-131, 2008.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. cap. 4.

GOMIDE, J. L. et al. Caracterização tecnológica para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, v. 1, n. 299, p. 129-137, 2005.

GONÇALVES, F. G. et al. Durabilidade natural de espécies florestais madeireiras ao ataque de cupim de madeira seca. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 1, n. 20, p. 110-116, 2013.

GONÇALEZ, J. C. et al. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

GONZÁLEZ, W. F. **Manual para produtores de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Costa Rica**. Heredia: SIREFOR, 2004. 115 p.

HAUPT, M. et al. Heartwood extractives and natural durability of plantation-grown teakwood (*Tectona grandis* L. f.): a case study. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 61, n. 6, p. 473-474, 2003.

HILL, C. A. S. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual de 2017**. Brasília: Studio 113, 2017. 80 p. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 13 set. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. ***Tectona grandis* (teca)**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/tectona.grandis.asp>>. Acesso em: 14 ago. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS ESTADO DE SÃO PAULO. **Ensaio acelerado de laboratório da resistência natural ou madeira preservada ao ataque de térmitas do gênero *Cryptotermes***. São Paulo: IPT/ DIMAD, 1980. 3 p.

KOCAEFE, D. et al. Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: thermogravimetric study. **Journal of Materials Science**, Berlin, v. 45, n. 3, p. 681-687, 2010.

LENGOWSKI, E. C. **Efeito da termorreificação nas propriedades anatômicas, físico-mecânicas e químicas das madeiras de *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis***. 2011. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LEONELLO, E. C.; PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W. Delimitação da madeira juvenil e adulta de *Eucalyptus grandis* em São Paulo, Brasil. **Revista Forestal Venezolana**, Mérida, v. 52, n. 1, p. 93-98, 2008.

LOPES, J. O. et al. Uniformização da cor da madeira jovem de teca pela termorreificação. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 561-568, 2014.

MIRANDA, I.; SOUZA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 57, n. 1, p. 171-178, 2011.

MODES, K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L. f. proveniente do vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

MOTTA, J. P. et al. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 8, p.1393-1398, 2013.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Efeitos da termorreificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 305-314, 2012.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo, 1997. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

OLIVEIRA, J. T. S. Propriedades físicas e mecânicas da madeira. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIELDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Vitória: Aquarius, 2007. cap. 5, p.129-163.

OLIVEIRA, J. T. da S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OLIVEIRA, R. M. **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies de madeiras tratadas termicamente**. 2009.123 f. Tese (Doutorado em Ciências)-Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PAES, J. B. Resistência natural da madeira de *Corymbia maculata* (Hook.) K. D. Hill. & L. A. S. Johnson a fungos e cupins xilófagos, em condições de laboratório. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 6, p. 761-767, 2002.

PAES, J. B. et al. Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (*Tectona grandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 3, p. 437-442, 2015a.

_____. Eficiência do óleo de candeia na melhoria da resistência da madeira de sumaúma a cupins. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 2, p. 217-225, 2010.

_____. Eficiência dos óleos de nim (*Azadirachta indica*) e de mamona (*Ricinus comunis*) na proteção da madeira de sumaúma (*Ceiba pentandra*) contra cupins xilófagos em ensaio de preferência alimentar. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 751-758, 2011.

_____. Resistance of thermally treated woods to *Nasutitermes corniger* in a food preference test. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 1, n. 21, p. 157-164, 2015b.

_____. Resistência natural de madeiras a fungos xilófagos em condições de laboratório. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 47, p. 199-210, 2007a.

_____. Resistência natural de sete madeiras a fungos e cupins xilófagos, em condições de laboratório. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 160-169, 2003.

_____. Resistência natural de sete madeiras ao cupim subterrâneo (*Nasutitermes corniger* Motsch.) em ensaio de preferência alimentar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 1, p. 57-62, 2007b.

PAES, J. B.; MELO, R. R.; LIMA, C. R. Resistência natural de sete madeiras a fungos e cupins xilófagos em condições de laboratório. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 160-169, 2007.

PAES, J. B.; MORAIS, V. M.; LIMA, C. R. Resistência natural de nove madeiras do semi-árido brasileiro a fungos xilófagos em condições de laboratório. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 275-282, 2004.

PESSOA, A. M. C.; FILHO, E. B.; BRITO, J. O. Avaliação da madeira termorretrificada de *Eucalyptus grandis*, submetida ao ataque de cupim de madeira seca *Cryptotermes brevis*. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 1, n. 72, p. 11-16, 2006.

RAMOS, L. M. A. et al. Radial variation of wood anatomical characters of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden and age of transition between adult and juvenile wood. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 411-418, 2011.

SANTOS, J. A. Mechanical behaviour of *Eucalyptus* wood modified by heat. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 34, n. 1, p. 39-43, 2000.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do Cerrado**. 2008. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SILVA, J. C.; LOPEZ, A. G. C.; OLIVEIRA, J. T. da S. Influência da idade na resistência natural da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden ao ataque de cupim de madeira seca (*Cryptotermes brevis*). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 583-587, 2004.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 455-460, 2005.

SILVÉRIO, F. O. et al. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 6, n. 62, p. 1009-1016, 2006.

SORATTO, D. N. **Efeito das variáveis do tratamento térmico nas propriedades da madeira de *Eucalyptus* sp.** 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

SUPRIANA, N. **Notes on the resistance of tropical wood against termites.** Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation, 1985. 9 p. (Doc. IRG/WP/1249).

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 204 cm-97:** Solvent extractives of wood and pulp. Norcross, 1997.

_____. **T 223 cm-01:** Pentosans in pulp and wood. Norcross, 2001.

TSOUMIS, G. T. **Science and technology of wood:** structure, properties, utilization. New York: Chapman & Hall, 1991.

VIDAURRE, G. B. et al. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.18, n. 4, p. 469-480, 2011.

VIVIAN, M. A. et al. Resistência biológica da madeira tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana* a fungos apodrecedores em ensaios de laboratório. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 175-183, 2015.

WIEDENHOEFT, A. C.; MILLER, R. B. Structure and function of wood. In: ROWEL, R.M. (Ed). **Handbook of wood chemistry and wood composites.** Boca Raton: CRC Press, 2005. cap. 2, p. 9-33.

APÊNDICE

Tabela A1. Resumo do teste H de Kruskal-Wallis do teor de lignina total

Tratamentos	Repetições	Soma dos postos	Média	alfa-5%
1	5	15,000	3,000	A
2	5	55,000	11,000	AB
3	5	50,000	10,000	AB
4	5	90,000	18,000	B

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A2. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado do teor de hemiceluloses

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	375,5103	125,1701	369,8205 *
Resíduo	16	5,4153	0,3384	
Total	19	380,9257		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A3. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado do teor de extrativos totais

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	816,9299	272,3099	929,9748 *
Resíduo	16	4,6850	0,2928	
Total	19	821,6150		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A4. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado da solubilidade em água fria

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	65,6546	21,8848	53,8314 *
Resíduo	16	6,5047	0,4065	
Total	19	72,1593		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A5. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado da solubilidade em água quente

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	37,6469	12,5489	873,2301 *
Resíduo	16	0,2305	0,0142	
Total	19	37,9736		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A6. Resumo da análise de variância da interação entre os fatores solvente (quatro níveis), espécie (dois níveis) e processo (dois níveis)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Solvente (1)	3	816,74663	272,24888	2667,9868 *
Espécie (2)	1	42,20239	42,20239	413,5753 *
Situação (3)	1	974,65232	974,65232	9551,4058 *
AxBXC	3	53,01257	17,67086	173,1710 *
Tratamentos	15	2342,80612	156,18707	1530,6034 *
Resíduo	64	6,5307	0,1020	
Total	79	2349,3368		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A7. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado da densidade aparente a 12%

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	0,1478	0,0492	29,0142 *
Resíduo	44	0,0747	0,0017	
Total	47	0,2225		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A8. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado da umidade de equilíbrio (%)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	214,0439	71,3479	219,1652 *
Resíduo	44	14,3239	0,3255	
Total	47	228,3679		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A9. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado do inchamento radial (%)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	31,2077	10,4025	22,8055 *
Resíduo	44	20,0702	0,4561	
Total	47	51,2779		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A10. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado do inchamento tangencial (%)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	179,0247	59,6749	54,7533 *
Resíduo	44	47,9550	1,0898	
Total	47	226,9798		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A11. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado do inchamento volumétrico (%)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	325,4815	108,4938	44,3343 *
Resíduo	44	107,6757	2,4471	
Total	47	433,1572		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A12. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado do módulo de ruptura (MOR) da flexão estática

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	17139,7263	5713,2421	50,7931 *
Resíduo	44	4949,1533	112,4807	
Total	47	22088,8796		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A13. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado do módulo de elasticidade (MOE) da flexão estática

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	81774259,7291	27258086,5763	14,7901 *
Resíduo	44	81093168,0833	1843026,5473	
Total	47	162867427,8125		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A14. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado da compressão paralela às fibras

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	3	5769,7104	1923,2368	64,4756 *
Resíduo	44	1312,4725	29,8289	
Total	47	7082,1829		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A15. Resumo da análise de variância da interação entre os fatores fungos (dois níveis), espécie (dois níveis) e processo (dois níveis)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Fungo (1)	1	6536,20437	6536,20437	145,8564 *
Espécie (2)	1	8322,83726	8322,83726	185,7254 *
Situação (3)	1	755,82088	755,82088	16,8663 *
AxBXC	1	271,55420	271,55420	6,0598 *
Tratamentos	7	17368,81719	2481,25960	55,3697*
Resíduo	88	3943,50813	44,81259	
Total	95	21312,32533		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A16. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado da perda de massa do ensaio com térmitas subterrâneas *Nasutitermes corniger*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	4	264,1142	66,0285	73,9737 *
Resíduo	45	40,1667	0,8926	
Total	49	304,2809		

* Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela A17. Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado da perda de massa do ensaio com térmitas de madeira seca *Cryptotermes brevis*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	4	18,6614	4,6653	169,8205 *
Resíduo	45	1,2362	0,0274	
Total	49	19,8977		

* Significativo a 5% de probabilidade.