

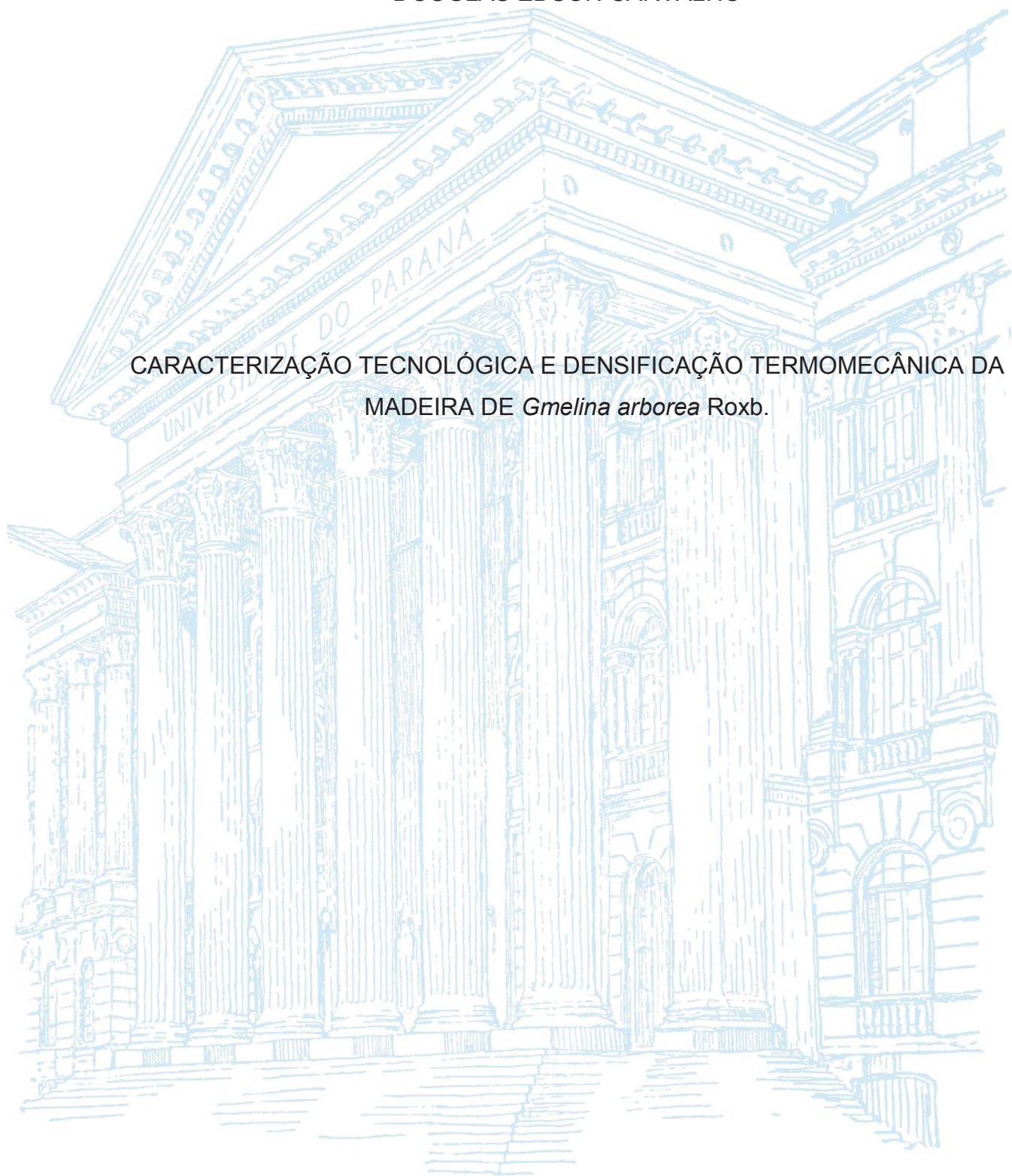
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DOUGLAS EDSON CARVALHO

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA  
MADEIRA DE *Gmelina arborea* Roxb.

CURITIBA

2020



DOUGLAS EDSON CARVALHO

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA  
MADEIRA DE *Gmelina arborea* Roxb.

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

Orientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Coorientadores: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke  
Prof. Dr. Pedro Henrique  
Gonzalez de Cademartori

CURITIBA

2020

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

Carvalho, Douglas Edson

Caracterização tecnológica e densificação termomecânica da madeira de *Gmelina arborea Roxb.* - Curitiba, 2020.

155 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Coorientadores: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Prof. Dr. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 14/02/2020.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Madeira - Secagem. 2. Madeira - Propriedades termomecânicas. 3. Madeira - Química. 4. Madeira - Qualidade. 5. Madeira serrada. 6. Gmelina. 7. Teses. I. Rocha, Márcio Pereira da. II. Klitzke, Ricardo Jorge. III. Cademartori, Pedro Henrique Gonzalez de. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.847

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



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

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **DOUGLAS EDSON CARVALHO** intitulada: **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* Roxb.**, sob orientação do Prof. Dr. MÁRCIO PEREIRA DA ROCHA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

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

CURITIBA, 14 de Fevereiro de 2020.



MÁRCIO PEREIRA DA ROCHA  
Presidente da Banca Examinadora



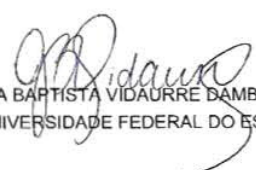
SETSUO IWAKIRI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



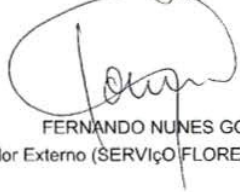
RICARDO JORGE KLITZKE

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



GRAZIELA BARTISTA VIDAURRÉ DAMBROZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO)



FERNANDO NUNES GOUVEIA

Avaliador Externo (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO)

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Douglas Edson Carvalho, filho de Ilce Venilda Arnemann e João Vanderlei Carvalho, nasceu em Tenente Portela – RS, no dia 19 de julho de 1987. Realizou o ensino fundamental na Escola Estadual 10 de Setembro e o ensino médio na Escola Estadual Affonso Wolf em Dois Irmãos – RS, concluindo em 2003. De 2003 a 2007 trabalhou como almoxarife em empresa do setor calçadista. Em 2007 iniciou o curso Técnico em Administração no Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, com conclusão no ano de 2009.

O ingresso no curso de Engenharia Florestal foi no ano de 2008 na Universidade Federal de Santa Maria - UFSM com período sanduíche na Universidade de Évora – Portugal, finalizando o curso em 2014. Durante a graduação atuou como bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC/CNPq desenvolvendo pesquisa junto ao Laboratório de Produtos Florestais.

Em 2014 ingressou no mestrado em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Paraná - UFPR com bolsa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq na área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais com dissertação finalizada no ano de 2016. Neste mesmo período atuou como consultor em serraria de eucalipto.

Iniciou em 2016 o doutorado no curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais da UFPR, sendo bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. No período de 2016 a 2018 atuou como professor substituto dos cursos de Engenharia Florestal e Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, ministrando as disciplinas de Biodegradação e Preservação da Madeira; Componentes Químicos e Anatômicos da Madeira; Construções Rurais; Economia Florestal; Engenharia Agrícola II; Planejamento e Administração Florestal; Silvicultura; Silvicultura Avançada e Tratos e Métodos Silviculturais.

## **DEDICO**

À minha família, em especial a minha mãe Ilce e ao meu irmão Vinícius, tenham certeza de que vocês são à base de tudo com importância ímpar nos obstáculos vencidos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar meus pensamentos e me conduzir aos melhores caminhos e escolhas.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) pela base estrutural laboratorial e pessoal, fundamentais para o desenvolvimento desta tese de doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o período do doutorado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha pela confiança em meu trabalho, ensinamentos, amizade e múltiplos conselhos e conversas, essenciais para as corretas tomadas de decisão na vida.

Aos meus coorientadores Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke e Prof. Dr. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori pela disposição e auxílios diversos, bem como pelas recomendações e compartilhamento de sabedorias durante este período.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Dois Vizinhos (UTFPR-DV) pelo espaço para realização de parte do trabalho.

À Foz do Chopim Energética e ao Eng. Ambiental Shelison Jarbas Ruschel pela disponibilidade da matéria-prima.

Ao Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos e Prof. Dr. José Guilherme Prata pelas dicas junto ao Laboratório de Tecnologia da Madeira.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Silvana Nisgoski pelo auxílio junto ao Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira (LANAQM).

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rosilani Trianoski pelo apoio junto ao Laboratório de Painéis de Madeira.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME-UFPR), ao Laboratório de Metrologia (UTFPR) e ao Laboratório de Controle de Qualidade e Química Farmacêutica pela disponibilidade de equipamentos e apoio técnico no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

Aos colaboradores: Mauro Vitor Greco Távora - Laboratório de Usinagem da Madeira; Eliane Lopes da Silva - Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira; Mariuci Torres dos Santos - Laboratório de Tecnologia da Madeira; Reinaldo e David – Secretaria da Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

A todos os colegas de pós-graduação, professores, amigos e familiares que de alguma forma se fizeram presentes durante este período com conhecimentos compartilhados, companheirismo e pelo convívio nas horas boas e ruins.

Em especial a minha noiva Ana Paula Marques Martins, pelo apoio incondicional, paciência, incentivo e motivação, contribuindo para minha formação e crescimento, tanto pessoal como profissional.



“Não se deve pedir que os acontecimentos ocorram como você quer, mas deve-se querê-los como ocorrem: assim sua vida será feliz.”

“O progresso moral não é um privilégio natural das elites nem é adquirido por acaso ou por sorte, mas através do trabalho de si mesmo - diariamente.”

(Epiteto).

## RESUMO

Como alternativa para modificar a estrutura e aprimorar algumas características da madeira o processo de densificação usando temperatura e pressão é uma opção, de modo a ampliar a gama de utilização de espécies, agregando valor ao produto final. Neste contexto, o presente trabalho aborda a caracterização tecnológica da madeira de *Gmelina arborea* Roxb. a partir de seis indivíduos procedentes de plantio na região sudoeste do Paraná e o uso de processo termomecânico para densificação. Foram aplicadas temperaturas de 140°C, 160°C e 180°C com compactação de 20% e 40%, alterando a espessura inicial de 25mm para 20mm e 15mm de espessura final, com pressão de  $25 \pm 3 \text{kgf.cm}^{-2}$  durante 30 minutos. Sendo assim, o trabalho foi dividido em capítulos, onde investigou-se o rendimento e o comportamento na secagem da madeira serrada da espécie; caracterizou-se suas propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas; com a aplicação da densificação termomecânica avaliou-se o efeito nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, bem como as alterações superficiais na cor, composição química, molhabilidade, rugosidade 3D e na morfologia. Para as análises foram realizados ensaios físicos, mecânicos e superficiais em amostras naturais e densificadas da madeira. Os resultados indicam que a espécie apresenta potencial para produção de madeira serrada sendo de fácil secagem. O lenho é de baixa densidade básica, estável dimensionalmente e com baixa resistência e dureza. O processo de densificação termomecânica resultou em aumento da densidade, redução do teor de umidade de equilíbrio, aumento da perda de massa e das propriedades mecânicas, porém não foi totalmente eficaz em evitar o efeito *springback*. Em relação às propriedades superficiais, os tratamentos atribuíram uma coloração mais escura às amostras densificadas, degradação superficial das hemiceluloses, reduziram a molhabilidade da face tangencial e os parâmetros de rugosidade, configurando uma técnica eficaz para redução de tais parâmetros para madeiras em geral, com mudança da morfologia superficial. Em termos gerais, o processo de densificação termomecânica pode ser utilizado como uma técnica para melhorar a qualidade da madeira. Destaca-se o tratamento com temperatura de 140°C e compactação em 40% (15mm), o qual atribuiu as melhores propriedades mecânicas e superficiais ao material.

Palavras-chave: Propriedades da madeira. Madeira densificada. Classes de densidade. Colorimetria. Molhabilidade. Rugosidade 3D superficial.

## ABSTRACT

As an alternative to modify the structure and improve some characteristics of the wood, the densification process using temperature and pressure is an option, in order to expand the range of use of species, adding value to the final product. In this context, the present work approach the technological characterization of *Gmelina arborea* Roxb. wood from six individuals from planting in the southwestern region of Paraná and the use of thermomechanical process for densification. Temperatures of 140°C, 160°C and 180°C were applied with compaction of 20% and 40%, changing the initial thickness from 25mm to 20mm and 15mm of final thickness, with a pressure of  $25 \pm 3 \text{ kgf.cm}^{-2}$  for 30 minutes. Thus, the work was divided into chapters, where the yield and the drying behavior of the sawn wood of the species were investigated; its anatomical, physical, chemical and mechanical properties were characterized; with the application of thermomechanical densification, the effect on the physical and mechanical properties of the wood was evaluated, as well as the superficial changes in color, chemical composition, wettability, 3D roughness and morphology. For the analyzes, physical, mechanical and surface tests were carried out on natural and densified wood samples. The results indicate that the specie has potential for the production of sawn wood and is easy to drying. The wood is of low basic density, dimensionally stable and with low resistance and hardness. The thermomechanical densification process resulted in increased density, reduction of equilibrium moisture content, increase in mass loss and mechanical properties, but were not totally effective in avoid the springback effect. Regarding the surface properties, the treatments attributed a darker coloration to the densified samples, surface degradation of hemicelluloses, reduced the wettability of the tangential section and the roughness parameters, constituting an effective technique for reducing such parameters for wood in general, with change of surface morphology. In general terms, the thermomechanical densification process can be used as a technique to improve wood quality. Stands out the treatment with temperature 140°C and 40% compaction (15mm), which assigns the best mechanical and surface properties to the material.

Keywords: Properties of wood. Densified wood. Density classes. Colorimetry. Wettability. 3D surface roughness.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DE <i>Gmelina arborea</i> EM FLORESTAS NATIVAS E PLANTADAS.....	20
FIGURA 2 - SISTEMA DE COORDENADAS DE CORES CIELAB 1976.....	32
FIGURA 3 - COMPORTAMENTO DA SUPERFÍCIE AO ÂNGULO DE CONTATO..	34
FIGURA 4 - INDIVÍDUO DE <i>Gmelina arborea</i> .....	40
FIGURA 5 – MODELO DE DESDOBRO TANGENCIAL APLICADO EM TORAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	42
FIGURA 6 – VARIAÇÃO LOCAL DA UMIDADE RELATIVA DO AR E TEMPERATURA NO PERÍODO DA SECAGEM .....	43
FIGURA 7 - PILHA DE SECAGEM AO AR LIVRE DE <i>Gmelina arborea</i> E AMOSTRA CONTROLE .....	44
FIGURA 8 – ASPECTO ESTÉTICO DE TÁBUA COM A FACE TANGENCIAL DA ESPÉCIE <i>Gmelina arborea</i> .....	48
FIGURA 9 – QUANTIDADE DE PEÇAS E LARGURAS DAS PEÇAS POR CLASSE DIAMÉTRICA.....	48
FIGURA 10 – CURVA DE SECAGEM AO AR E UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> AOS 25 ANOS DE IDADE.....	50
FIGURA 11 - OBTENÇÃO DE TORAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	56
FIGURA 12 - IMAGENS ANATÔMICAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	61
FIGURA 13 – UTILIZAÇÃO DA PRENSA HIDRÁULICA E MEDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA .....	75
FIGURA 14 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA COM AS TEMPERATURAS E PRESSÃO DA PRENSA HIDRÁULICA.....	76
FIGURA 15 - DIAGRAMA DO PROCESSO DE DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA COM AS TEMPERATURAS INTERNAS DAS MADEIRAS DE <i>Gmelina arborea</i> EM CADA TRATAMENTO .....	81
FIGURA 16 - ASPECTO IRREGULAR NO CENTRO DA PEÇA (A), RACHADURAS INTERNAS (B) E DESFIBRAMENTO EM MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> DENSIFICADA ACIMA DE 180°C .....	82

FIGURA 17 - DENSIDADE APARENTE MÉDIA DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> APÓS A DENSIFICAÇÃO COM DIFERENTES TEMPERATURAS E COMPACTAÇÕES.....	84
FIGURA 18 – PERDA DE MASSA DA DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	85
FIGURA 19 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DAS MADEIRAS DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	86
FIGURA 20 - TAXA DE RETRAÇÃO EM ESPESSURA DA MADEIRA NATURAL E AMOSTRAS DENSIFICADAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> ...	87
FIGURA 21 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA NATURAL E AMOSTRAS DENSIFICADAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	88
FIGURA 22 - INCHAMENTO EM ESPESSURA DA MADEIRA NATURAL E AMOSTRAS DENSIFICADAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> ...	90
FIGURA 23 - VALORES MÉDIOS DA DUREZA JANKA PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	92
FIGURA 24 - VALORES MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS – MOR (MPa) PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	94
FIGURA 25 - VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO – MOEd (MPa) PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	95
FIGURA 26 - PARÂMETROS $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $C$ E $h^*$ E ASPECTO VISUAL DAS AMOSTRAS DE <i>Gmelina arborea</i> EM CONDIÇÃO NATURAL E APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS DE DENSIFICAÇÃO	104
FIGURA 27 - DIAGRAMA DE LUMINOSIDADE ( $L^*$ ) X SATURAÇÃO ( $C$ ) DAS AMOSTRAS DE <i>Gmelina arborea</i> EM CONDIÇÃO NATURAL E TRATADAS .....	106
FIGURA 28 - VARIAÇÕES OCORRIDAS ENTRE OS VALORES DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS AMOSTRAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS DE DENSIFICAÇÃO EM RELAÇÃO À MADEIRA NATURAL .....	109
FIGURA 29. ESPECTROS ATR-FTIR DE AMOSTRAS SUPERFICIAIS DE MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	111

FIGURA 30 - COMPORTAMENTO DO ÂNGULO DE CONTATO APARENTE PARA O A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DEPOSIÇÃO DA GOTÍCULA NA SUPERFÍCIE TANGENCIAL DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	113
FIGURA 31 - COMPORTAMENTO DA GOTA DE ÁGUA E DO ÂNGULO DE CONTATO APARENTE AO LONGO DO TEMPO EM MADEIRA DENSIFICADA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	113
FIGURA 32 - ÂNGULO DE CONTATO APARENTE MÉDIO DA SUPERFÍCIE TANGENCIAL PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	114
FIGURA 33 - COMPORTAMENTO DO ÂNGULO DE CONTATO APARENTE PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DEPOSIÇÃO DA GOTÍCULA NA SUPERFÍCIE RADIAL DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	115
FIGURA 34 - ÂNGULO DE CONTATO APARENTE MÉDIO DA SUPERFÍCIE RADIAL PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	116
FIGURA 35 - IMAGENS TOPOGRÁFICAS REPRESENTATIVAS DA SUPERFÍCIE 3D DA MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	117
FIGURA 36 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DA FACE TRANSVERSAL DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	121
FIGURA 37 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DA FACE TRANSVERSAL ILUSTRANDO O PERFIL DE ALTERAÇÃO NOS VASOS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	122
FIGURA 38 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DA FACE TANGENCIAL DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	123
FIGURA 39 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DA FACE RADIAL DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	124

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSES DIAMÉTRICAS DAS TORAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	41
TABELA 2 – RENDIMENTO EM MADEIRA SERRADA DE <i>Gmelina arborea</i> EM TRÊS CLASSES DIAMÉTRICAS.....	47
TABELA 3 – TAXA DE SECAGEM (% U DIA <sup>-1</sup> ) DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i>	52
TABELA 4 – VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DE VASOS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> EM TRÊS POSIÇÕES DO FUSTE..	62
TABELA 5 – VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DOS RAIOS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> EM TRÊS POSIÇÕES DO FUSTE..	63
TABELA 6 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (R) ENTRE A DENSIDADE BÁSICA (Db) COM OS PARÂMETROS ANATÔMICOS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	63
TABELA 7 – VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DE FIBRAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> EM TRÊS POSIÇÕES RADIAIS .....	64
TABELA 8 – DENSIDADE BÁSICA EM TRÊS POSIÇÕES DO FUSTE E DENSIDADE APARENTE (12%) DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	65
TABELA 9 – VALORES MÉDIOS DE RETRAÇÃO TOTAL AXIAL, RADIAL, TANGENCIAL VOLUMÉTRICA E FATOR ANISOTRÓPICO DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	67
TABELA 10 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (R) ENTRE A DENSIDADE BÁSICA E APARENTE COM OS PARÂMETROS DE RETRAÇÕES DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	68
TABELA 11 - TEORES (%) DE CINZAS, VOLÁTEIS, CARBONO FIXO, EXTRATIVOS TOTAIS, LIGNINA E HOLOCELULOSE DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	68
TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> OBTIDAS A 12% DE UMIDADE.....	70
TABELA 13 - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DOS TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS UTILIZADOS PARA DENSIFICAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE PEÇAS DE <i>Gmelina arborea</i> .....	77

TABELA 14 - DENSIDADE APARENTE INICIAL MÉDIO DAS AMOSTRAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	83
TABELA 15 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE A DENSIDADE, MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO, DUREZA JANKA E COMPRESSÃO DAS MADEIRAS DENSIFICADAS E NATURAL DE <i>Gmelina arborea</i> .....	96
TABELA 16 - CLASSIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO TOTAL DA COR ( $\Delta E^*$ ) DE MADEIRAS .....	101
TABELA 17 - VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS AMOSTRAS DE <i>Gmelina arborea</i> EM CONDIÇÃO NATURAL E DENSIFICADAS.....	106
TABELA 18 - VARIAÇÕES PERCENTUAIS ENTRE OS VALORES DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS AMOSTRAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS DE DENSIFICAÇÃO EM RELAÇÃO AO ESTADO NATURAL DA MADEIRA.....	107
TABELA 19 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO E OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $C$ E $h^*$ .....	110
TABELA 20 - PARÂMETROS DA RUGOSIDADE 3D SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS DE MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> CONFORME A NORMA ISO-25178.....	118
TABELA 21 - PARÂMETROS DA RUGOSIDADE 3D SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS DE MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE <i>Gmelina arborea</i> CONFORME A NORMA EUR-15178N.....	119



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: ASPECTOS GERAIS .....</b>	<b>16</b>
<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	18
1.1.1 Objetivo geral .....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
1.3 A ESPÉCIE <i>Gmelina arborea</i> Roxb. ....	20
1.4 PROPRIEDADES DA MADEIRA.....	22
1.4.1 Anatômicas.....	22
1.4.2 Químicas .....	24
1.4.3 Físicas.....	25
1.4.4 Mecânicas .....	26
1.5 TRATAMENTOS COM TEMPERATURA NA MADEIRA.....	28
1.6 ALTERAÇÕES SUPERFICIAIS E ESTÉTICAS .....	31
1.7 DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA.....	34
<b>CAPÍTULO 2: RENDIMENTO E SECAGEM DA MADEIRA.....</b>	<b>38</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
2.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE COLETA E OBTENÇÃO DO MATERIAL .....	40
2.2 DESDOBRO E RENDIMENTO DA MADEIRA SERRADA.....	41
2.3 SECAGEM AO AR LIVRE .....	43
2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	46
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>47</b>
3.1 RENDIMENTO EM MADEIRA SERRADA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	47
3.2 SECAGEM AO AR LIVRE DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....	49
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO 3: PROPRIEDADES DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....</b>	<b>54</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
2.1 PROPRIEDADES ANATÔMICAS .....	56
2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS .....	58

2.2.1 Densidade básica e aparente .....	58
2.2.2 Variação dimensional da madeira .....	58
2.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS .....	59
2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	59
2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	60
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>61</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA.....	61
3.1.1 Descrição anatômica da madeira de <i>Gmelina arborea</i> .....	61
3.1.2 Análise da estrutura anatômica da madeira .....	62
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	65
3.2.1 Densidade da madeira .....	65
3.2.2 Variação dimensional da madeira .....	66
3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....	68
3.4 CARATERIZAÇÃO MECÂNICA.....	70
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>CAPÍTULO 4: EFEITO DA DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i>.....</b>	<b>73</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>75</b>
2.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA .....	75
2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS .....	77
2.2.1 Densidade aparente .....	77
2.2.2 Perda de massa .....	78
2.2.3 Teor de umidade de equilíbrio.....	78
2.2.4 Estabilidade dimensional.....	78
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	79
2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	80
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>81</b>
3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS .....	83
3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	92
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>CAPÍTULO 5: EFEITO DA DENSIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS E MORFOLÓGICAS DA MADEIRA DE <i>Gmelina arborea</i> .....</b>	<b>98</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>98</b>

<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>100</b>
2.1 COLORIMETRIA .....	100
2.2 ESPECTROSCOPIA .....	101
2.3 MOLHABILIDADE .....	102
2.4 RUGOSIDADE 3D SUPERFICIAL .....	102
2.5 MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE.....	102
2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	103
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>104</b>
3.1 EFEITO DA DENSIFICAÇÃO NA COLORIMETRIA DA MADEIRA .....	104
3.2 ALTERAÇÕES QUÍMICAS SUPERFICIAIS ANALISADAS POR ESPECTROSCOPIA FTIR .....	110
3.3 EFEITO DA DENSIFICAÇÃO NA MOLHABILIDADE DA MADEIRA .....	112
3.4 EFEITO DA DENSIFICAÇÃO NA RUGOSIDADE DA MADEIRA .....	117
3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	120
<b>4 . CONCLUSÕES</b> .....	<b>125</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>126</b>
<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>126</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>127</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>150</b>

## CAPÍTULO 1: ASPECTOS GERAIS

### 1 INTRODUÇÃO GERAL

A tendência de crescimento dos cultivos florestais em nível global é uma realidade eminente. Este fato é associado à crescente demanda de produtos madeireiros de origem sustentável com capacidade de suprir, em quantidade e qualidade, as necessidades do setor de produtos à base de madeira em períodos de tempo relativamente curtos.

Para obter sucesso no uso de uma espécie florestal é necessário conhecer suas características tecnológicas, adequando-a a melhor aplicação. Por serem amplamente utilizadas no setor industrial, espécies exóticas merecem atenção quanto ao conhecimento de suas características e comportamento, pois, para determinados fins, algumas propriedades da madeira são indesejadas e limitam a empregabilidade da mesma.

Os cultivos florestais no Brasil são em sua maioria de espécies exóticas, devido aos longos anos de melhoramento genético e por apresentarem excelente potencial de crescimento com rotações florestais curtas, Porém, para o sucesso de implementação é necessário conhecer a espécie e suas exigências edafoclimáticas, proporcionando controle e manejo silvicultural adequado, garantindo produtividade em larga escala.

A falta de conhecimento sobre as exigências da espécie é exemplificada pela inserção de plantio de *Gmelina arborea* Roxb. na Floresta Amazônica, a qual não apresentou os resultados esperados, pois os solos da região não possuem fertilidade adequada para a espécie. Tal fato configurou um erro por parte dos silvicultores, uma vez que esta espécie apresenta crescimento rápido, entretanto, limitado em solos pobres e arenosos (MITCHUAL et al.,2018).

Algumas características da madeira de espécies com altas taxas de crescimento tendem a serem inferiores ou insatisfatórias para determinados fins como a densidade e as propriedades mecânicas. Normalmente essas árvores são colhidas ainda jovens e a proporção de madeira juvenil tende a ser maior (CAHYONO et al., 2015).

A introdução de espécies florestais cultiváveis com elevadas taxas de crescimento deve estar atrelada ao seu melhoramento genético e ao

desenvolvimento de novas tecnologias e processos capazes de dar origem a produtos e aplicações inovadoras a madeira. Com isso há expansão dos conhecimentos científicos e tecnológicos, agregando valor a espécie florestal, caracterizando-a e transformando a madeira de florestas em artigos manufaturados com diferentes aplicações.

As questões ambientais levam a indústria a substituir materiais como aço, concreto e polímeros sintéticos por materiais naturais e renováveis, como a madeira, cuja procura está aumentando fortemente (BIGAN e MUTEL, 2018). A busca elevada por novos produtos, associada às diversas aplicações tecnológicas da madeira, como produto industrial, ocasionado pelo aumento da população mundial, incide sobre a necessidade de madeira de qualidade.

Essa situação estabelece uso mais eficiente dos recursos existentes e a utilização de espécies de baixo interesse, as quais, através de processos tecnológicos de modificação, auxiliam na produção de materiais diferenciados para o setor industrial (PELIT et al., 2014). Entretanto, por ser um material heterogêneo, nem todas as características da madeira são satisfatórias, o que favorece o desenvolvimento de estudos visando alterações das propriedades, eliminando ou minimizando fatores indesejados da madeira.

Associado ao mencionado e sabendo do aumento dos preços da madeira é primordial a investigação para substituir espécies arbóreas de alto valor por espécies consideradas de qualidade inferior (BEKHTA et al., 2016). A qualidade da madeira de espécies de rápido crescimento pode ser melhorada pelo processo de tratamento com calor e pressão. O método termomecânico para densificação da madeira altera a estrutura porosa da matéria-prima, comprimido-a entre chapas de metal aquecidos.

Esta técnica pode atingir níveis de desempenho físico-mecânico correspondente a madeiras de média e alta densidade, configurando uma alternativa para produção de móveis, revestimentos de pavimentos e estruturas de madeira em geral (ULKER et al., 2012). Para isso, a necessidade de pesquisas com a finalidade de elevar a densidade de espécies para que possam ser utilizadas em produtos variados, atingindo novos mercados, é imprescindível (VIDAURRE et al., 2018).

Espécies consideradas de qualidade inferior, seja por características intrínsecas ou extrínsecas, merecem atenção, de modo a agregar valor em seus produtos. Estudos elaborados por Peres et al. (2012); Cobas et al. (2013) e Vidaurre

et al. (2018), relatam informações acerca das propriedades da madeira juvenil e influências sobre os produtos provenientes de tal lenho. Haja vista que a madeira juvenil apresenta inconsistência quanto ao seu desempenho, à prática da densificação objetiva melhorias quanto ao comportamento da madeira de lenho juvenil, uma vez que por possuírem paredes celulares mais finas em relação à madeira adulta o processo de densificação ocorre mais facilmente (DOGU et al., 2010; LAINE et al., 2014).

Portanto, a aplicação da tecnologia termomecânica para densificação visa melhorar as propriedades da madeira de modo a ampliar a gama de utilização da espécie, agregando valor ao produto final. Neste contexto, o presente trabalho aborda a caracterização tecnológica da madeira de *Gmelina arborea* Roxb., o uso de processo termomecânico para densificação de sua madeira e as influências em suas propriedades.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar a madeira de *Gmelina arborea* Roxb. e investigar o efeito da densificação termomecânica sobre suas propriedades físicas, mecânicas, superficiais e morfológicas fornecendo ao mercado alternativas de matéria-prima para maior gama de produtos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Investigar o rendimento e o comportamento da madeira serrada de *Gmelina arborea* Roxb. submetida a secagem natural;
- b) Caracterizar as propriedades físicas, químicas, mecânicas e anatômicas da madeira;
- c) Avaliar o efeito da densificação termomecânica nas propriedades físicas e mecânicas da madeira;
- d) Investigar as alterações superficiais na cor, composição química, molhabilidade, rugosidade 3D e morfologia da madeira densificada.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para atingir os objetivos traçados, a tese foi organizada em capítulos compostos pelos itens descritos a seguir:

Capítulo 1: Introdução geral; objetivo geral e objetivos específicos; organização do trabalho e revisão de literatura.

Capítulo 2: Aborda o rendimento e o comportamento na secagem da madeira de *Gmelina arborea*.

Capítulo 3: Descreve a caracterização das propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas da madeira.

Capítulo 4: Analisa as densificações da madeira utilizando processo termomecânico e suas implicações nas propriedades físicas e mecânicas.

Capítulo 5: Investiga as alterações superficiais em cor, composição química, molhabilidade, rugosidade 3D e morfologia das seções radial, tangencial e transversal da madeira natural e densificadas.

Com exceção do primeiro capítulo, os demais são compostos por: introdução; materiais e métodos; resultados e discussões; e conclusões.

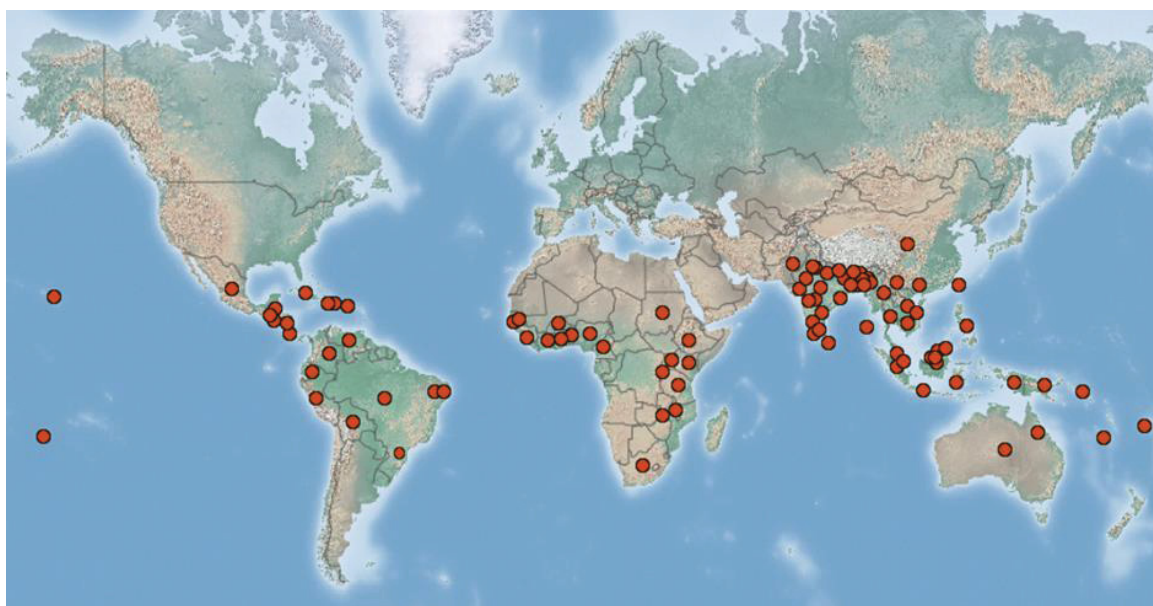
## REVISÃO DE LITERATURA

### 1.3 A ESPÉCIE *Gmelina arborea* Roxb.

*Gmelina arborea* Roxb. pertence à família Lamiaceae, nativa do sudeste da Ásia, podendo ser encontrada também na Malásia e Filipinas (LAMB, 1968; KEAY, 1989; DUPUY e MILLE, 1993; DHAKULKAR et al., 2005). É popularmente denominada *melina*, *yemane*, *white teak* ou *gmelina* (RIVERO, 2004). A espécie tolera uma ampla gama de condições ambientais, mas cresce melhor quando os extremos de temperatura estão entre 18 a 35°C, precipitação anual média entre 1778 a 2286 mm, com umidade atmosférica acima de 40% e altitude entre 0 a 1300 m (ROJAS-RODRÍGUEZ et al., 2004; MUÑOZ et al., 2010).

Os solos profundos, férteis, úmidos, bem drenados e arejados, são preferíveis (HOSSAIN, 1999; ONYEKWELU, 2004; EBY et al., 2017). A espécie apresenta rápida taxa de crescimento, facilidade de propagação por sementes e estacas, com rotações curtas, o que contribui para o sucesso nas plantações (GREAVES, 1979; PANDEY, 1995). Estas características, aliadas ao interesse econômico fizeram com que fosse introduzida em países tropicais como Nigéria, Gana, Nicarágua, Senegal, Costa Rica, Libéria, Brasil e Belize (FIGURA 1) (ONYEKWELU, 2004; EBY et al., 2017).

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DE *Gmelina arborea* EM FLORESTAS NATIVAS E PLANTADAS



FONTE: Plants of the world. Disponível em: <https://www.cabi.org>



*Gmelina arborea* apresenta fenologia de uma típica espécie tropical decídua, com crescimento exuberantemente ao longo das estações do fim da primavera e do verão e passa por uma completa senescência no inverno (RASINENI et al., 2011). A espécie é considerada promissora na facilidade de produção e de rápido crescimento, amplamente utilizada em programas comerciais de reflorestamento em países tropicais para produção de madeira serrada e celulose (ZOBEL e BUIJTENEN, 1989; LAURIDSEN e KJAER, 2002; DVORAK, 2004; MITCHUAL et al., 2018).

Além disso, o cultivo em plantações de larga escala objetiva produzir madeira para construção leve, artesanato, folheados decorativos e combustível, produzindo madeira de alta qualidade, que é colhida para a fabricação de móveis, instrumentos musicais, compensados, palitos de fósforos e implementos agrícolas; as folhas são amplamente utilizadas como forragem de gado e na cultura do bicho-da-seda; as cinzas da madeira e frutos produzem corantes amarelos muito persistentes (ORWA et al., 2009; PLANT RESOURCES OF TROPICAL AFRICA, 2016).

Costumeiramente a espécie é encontrada em seu habitat natural em associações com outras espécies, como *Terminalia* sp., *Tectona* sp., *Shorea* sp. (VERMA et al., 2017). Adekunle et al. (2011) cita que há muitos plantios estabelecidos com *Gmelina arborea* e Teca (*Tectona* sp.), com finalidades diferentes, a primeira destinada ao fornecimento de matéria-prima para o setor de celulose e papel e a segunda para suprir a demanda de madeira serrada de alta qualidade.

No Brasil, a espécie foi introduzida por Daniel K. Ludwig, em 1969, na região de Jari, norte da Amazônia, onde substituiu a floresta tropical com o objetivo de suprir a demanda de madeira para a produção de celulose e papel dos anos futuros (PALMER, 1977). Entretanto, a qualidade baixa do solo da região associada à necessidade elevada de nutrientes da espécie resultou em taxas de crescimento inferiores ao local de origem, acarretando na substituição desta espécie por outras culturas florestais (HORNICK et al., 1984). Swamy et al. (2004) indicam a baixa qualidade dos solos como principal fator limitante ao crescimento da espécie.

Estudos foram efetuados com material proveniente de áreas plantadas com *Gmelina arborea* nas regiões de Morretes e Antonina, no litoral paranaense, pertencente à empresa Faber Castell, nomeadamente Marcene et al. (2006) analisando teores de carbono e Muñiz et al. (2014) utilizando espectroscopia de

ressonância para detectar e quantificar o conteúdo de radicais livres orgânicos relacionando com o teor de carbono dos anéis de crescimento.

No mundo, várias plantações da espécie foram estabelecidas, principalmente no sul da Nigéria, como possível matéria-prima para indústrias de celulose e papel (AZZEZ et al., 2016), estimadas em 112.000 hectares (ONYEKWELU, 2004). Na Colômbia pretende-se plantar 200.000 hectares de *Gmelina arborea* até 2025, fundamentado em estudos de seleção e melhoramento genético, estimando ganhos de 5, 15, 36 e 34% para diâmetro a altura do peito (DAP), altura comercial, volume comercial e qualidade da tora, respectivamente (ESPITIA et al., 2016).

Em plantio comercial na Costa Rica com seis anos de idade, a espécie apresentou altura total média de 15,9 metros, com DAP de 20,6 cm (MOYA-ROQUE et al., 2017). Já ONYEKWELU et al. (2006) encontrou valores de 18,4 m em altura total média e 20,3cm em DAP, em floresta plantada com dez anos, chegando a 25,3m e 42,4cm, para altura total média e DAP, respectivamente, aos 28 anos de idade. Piotto et al. (2003) mencionam incremento médio em volume de 31,49m<sup>3</sup>/ha/ano e Calvo-Alvarado et al. (2007) citam que o desenvolvimento da espécie é suscetível as condições locais onde está inserida, o que altera seu rendimento volumétrico, com incrementos variando entre 20 a 45m<sup>3</sup>/ha/ano.

Em conformidade com o descrito, Moya-Roque et al. (2007) descrevem que a utilização de *Gmelina arborea* em plantações florestais está associada às práticas silviculturais aplicadas, as quais alteram as taxas de crescimento da espécie, sendo essencial a atenção a estes parâmetros para o bom desenvolvimento da espécie.

## 1.4 PROPRIEDADES DA MADEIRA

### 1.4.1 Anatômicas

A madeira é um recurso renovável e um dos materiais mais importantes da civilização humana, com inúmeras aplicações, desde materiais estruturais até matéria-prima para energia (LI et al., 2010). Para indicar aplicações adequadas é necessário o reconhecimento de espécies madeireiras, buscando diferenciar as espécies com base em suas características macro e microscópicas (BARMPOUTIS et al., 2018).

Estas características podem ser observadas em diferentes planos da madeira, principalmente na seção transversal (JONES, 2016). Para complementar a caracterização, informações como cor, densidade, cheiro e grã podem ser utilizadas para a identificação correta de espécies (VOULGARIDIS et al., 2000).

A madeira de folhosas caracteriza-se por possuir vários tipos de células, fibras, traqueídeos, células de parênquima intercalado por vasos porosos, semi-porosos e difusos, variando consideravelmente entre espécies, com arranjos e tamanhos diferentes (BORST e BADER, 2014). O conhecimento destas características é uma ferramenta útil para a identificação de madeira (BAJPAI, 2018).

A variação da estrutura anatômica de cada espécie (disposição, arranjo, proporções, dimensões e organização de seus elementos celulares), influenciam o comportamento tecnológico da madeira, como densidade, trabalhabilidade, durabilidade, permeabilidade e propriedades mecânicas (MAFRA, 1994; ALVES et al., 2012). Outros atributos anatômicos podem influenciar o comportamento da madeira, como o comprimento de fibra, espessura de parede, diâmetro do lúmen e frequência de vasos (NUGHORO et al., 2012; LOURENÇON et al., 2014).

As características das fibras determinam o tipo de lenho da madeira, se juvenil, adulto ou de transição (LARA PALMA et al., 2010; GATTO et al., 2012). Inicialmente é formada a madeira juvenil, a partir de células meristemáticas do câmbio, possuindo forma cilíndrica desde a base até o topo da árvore; já o lenho adulto começa a se formar à medida que o efeito dos meristemas apicais é reduzido na base do fuste da árvore (EVERT, 2006).

A madeira juvenil caracteriza-se por taxa de crescimento elevada, entretanto apresenta baixa densidade básica, baixa rigidez, maior propensão à madeira de reação e fibras curtas (DONALDSON et al., 2017). Já a madeira adulta é preferível por apresentar qualidade tecnológica superior em relação à madeira juvenil (LEONELLO et al., 2008).

A grandeza entre os lenhos pode variar entre espécies e até mesmo entre árvores de mesma espécie, influenciada por condições genéticas, produção hormonal, condições edafoclimáticas e tratos silviculturais (ZHU et al., 2000; NUGHORO et al., 2012). Porém, tais variações podem afetar negativamente as propriedades da madeira, especialmente em processos de industrialização e transformação da madeira em outros produtos (PALERMO et al., 2013).

A região de transição entre lenhos é considerada de difícil identificação, uma vez que esta ocorre de maneira gradual (EVERT, 2006). O comprimento das fibras aumenta até o ponto de transição entre lenhos, estabilizando seu comprimento posteriormente, atingindo a idade adulta, sendo este parâmetro o principal indicador de transição entre madeira juvenil para adulta (GATTO et al., 2007; PALERMO et al., 2013).

Pesquisas recentes alertam sobre a necessidade de maiores estudos para conhecer o comportamento tecnológico de madeiras juvenis, pois o desempenho físico e mecânico desta madeira está condicionado às suas características anatômicas e ultraestruturais (MUÑOZ et al., 2012; LONGUI et al., 2014). Conhecendo a microestrutura anatômica, as particularidades de processamento e a qualidade da madeira, mais eficiente é o processo de agregar valor uma espécie (SHUKLA e KAMDEM, 2018).

#### 1.4.2 Químicas

A madeira é um material lignocelulósico que surge do câmbio de árvores e arbustos e consiste em celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos (BAJPAI, 2018). Suas propriedades dependem das combinações das propriedades químicas desses componentes (BIGAN e MUTEL, 2018).

A celulose é definida como um polissacarídeo linear, que fornece rigidez e resistência à madeira, com características mecânicas próximas às do aço, composta de fibras com um núcleo cristalino e uma cobertura amorfa em dimensões tipicamente de várias dezenas de nanômetros de espessura. Já as hemiceluloses e a lignina formam uma matriz amorfa onde as fibras de celulose são incorporadas (BORST et al., 2013).

A celulose e hemiceluloses são hidrofílicas, enquanto a lignina e substâncias extrativas, em sua maioria, são hidrofóbicas (BIGAN e MUTEL, 2018). A lignina atua como um material incrustante sobre as microfibrilas da madeira, atribuindo rigidez à parede celular (EATON e HALE, 1993) e quando aquecida a temperaturas acima de 160°C e em presença de umidade, passa por um processo de “plastificação” (HAKKOU et al. 2005), também denominado como transição vítrea.

Aproximadamente 70% da madeira são compostos hidrofílicos, apresentando uma relação muito forte com a água, a qual é elevada devido à estrutura porosa da

madeira, causando inchamento e deformações quando em contato com a umidade (BIGAN e MUTEL, 2018). Isto é ocasionado principalmente por grupos hidroxila dos polímeros da parede celular, que atraem e retêm umidade através das ligações de hidrogênio (PUGLIA, BIOAGIOTTI, KENNY, 2005).

Além dos componentes lignocelulósicos, a madeira apresenta uma variedade de compostos orgânicos de baixo peso molecular, denominados extrativos, um grupo de substâncias químicas compostos por resinas, fenóis, ácidos graxos, álcoois graxos, terpenos, esteroides, ceras e outros compostos orgânicos menores (DAMMSTRÖM, SALMÉN, GATENHOLM, 2009).

Através da análise química imediata (AQI) obtêm-se algumas informações da madeira, como teor de material volátil, teor de carbono fixo e teor de cinzas, permitindo caracterizar a espécie e indicar possíveis aplicações da mesma (ELOY et al., 2015).

#### 1.4.3 Físicas

Por ser um material natural, heterogêneo e as árvores estarem sujeitas a inúmeras influências, as propriedades da madeira, físicas e mecânicas, variam consideravelmente (BAJPAI, 2018). Ademais, as variações de fatores abióticos, assim como a ação de organismos bióticos, causam a alteração das características físicas e mecânicas e conseqüentemente limitam o uso da madeira (HILL, 2006). Diante disso, conhecer estas propriedades, assim como seu comportamento possibilita o uso mais coerente da espécie (MINÁ e DIAS, 2008; CARREIRA et al., 2012).

As características físicas apresentam relações diretas com a maior parte das propriedades e com a composição celular da madeira, especialmente a densidade, sendo um dos principais parâmetros utilizados para qualificação geral e caracterização comportamental nos processos tecnológicos e industriais (BATISTA et al., 2010; PRIADI e HIZIROGLU, 2013), especialmente quanto às exigências mecânicas da madeira (MATTOS et al., 2011; FAGGIANO e MARZO, 2015).

Esta propriedade refere-se à quantidade de matéria lenhosa contida em uma unidade de volume (PERES et al., 2012) e fazendo uso da mesma, como variável independente em equações de regressão, é possível estimar as propriedades mecânicas da madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Entretanto, a

densidade pode apresentar uma ampla variação, em função dos tipos e dimensões de células, quantidade de extrativos presentes por unidade de volume (PANSHIN e DE ZEEUW, 1980; MATTOS et al., 2011), assim como por variações ambientais e tratos silviculturais (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968; TREVISAN et al., 2007).

A estabilidade dimensional e qualidade superficial da madeira usinada também podem ser afetadas por esta propriedade (LOPES et al., 2011). Ademais, espécies que apresentam densidade elevada apresentam maior resistência mecânica, mas podem ter variação volumétrica maior em função das mudanças de umidade relativa do ar (HEIN et al., 2013; SCHULGASSER e WITZTUM, 2015).

Quando o teor de umidade fica abaixo do ponto de saturação das fibras a madeira pode variar dimensionalmente (OLIVEIRA et al., 2010), fenômeno denominado retratibilidade, o qual pode alterar transversalmente e longitudinalmente as dimensões da madeira (DONALDSON, 2008). Teor de umidade da madeira acima de 20% pode deixá-la suscetível ao ataque de fungos, que podem degradar a parede celular, resultando em perda significativa das propriedades mecânicas, além de alterações dimensionais, as quais limitam o uso da madeira para determinadas aplicações (RAMAGE et al, 2017).

Portanto, o conteúdo de água incrustado na parede celular afeta as propriedades da madeira, como mecânicas e físicas (ANSELL, 2015). A adsorção de umidade pelos polímeros da parede celular depende de sua natureza hidrofílica e também da acessibilidade da água aos grupos hidroxila através das ligações de hidrogênio (UMIT et al., 2004) e como as hemiceluloses são os componentes mais higroscópicos da madeira, sua decomposição reduz a higroscopicidade (OBATAYA, 2017).

Nesse sentido, o tratamento com temperaturas pode alterar alguns compostos da madeira, melhorando suas propriedades físicas, principalmente a higroscopicidade e os efeitos relacionados ao inchamento e retração da madeira (TJEERDSMA e MILITZ, 2005; BAKAR et al., 2013).

#### 1.4.4 Mecânicas

A alta relação resistência/peso da madeira, sua estrutura porosa e aspectos estéticos propiciam sua utilização em segmentos variados, desde a construção e movelaria até o uso em meio artístico (DING et al., 2013). Entretanto, a

heterogeneidade já conhecida, afeta significativamente suas propriedades mecânicas (LIMA e GARCIA, 2010; LEONELLO et al., 2012). O comportamento mecânico pode ser explicado pela estrutura anatômica da parede celular e composição química da madeira (AJUONG et al., 2010), porém, como um material natural, a madeira exibe uma variação inerente às suas propriedades, mesmo em amostras da mesma espécie (RIDLEY-ELLIS et al., 2009).

Para Kollmann e Cotê (1968), a determinação de características como a flexão, compressão e dureza, entre outras, definem a classificação da madeira quanto à sua resistência, diferenciando-se quanto à orientação da aplicação do esforço na madeira. Abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) há uma relação inversa entre as propriedades mecânicas e o teor de umidade da madeira (DINWOODIE, 2000). Deste modo, a redução do teor de umidade, por secagem natural ou forçada, melhora as propriedades mecânicas da madeira além de proporcionar menor variação dimensional (RAMAGE et al., 2017).

No ensaio de flexão estática, onde uma carga é aplicada perpendicular às fibras, obtém-se o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), utilizados para caracterizar a madeira (LOURENÇON et al., 2014). Esses valores podem variar entre 7 e 20% para uma mesma espécie (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Esta variação pode ser afetada pela quantidade de lenho adulto e juvenil presente na madeira, normalmente com menores valores em madeira com mais lenho juvenil (LOURENÇON et al., 2014) e também pelas condições de umidade e tipo de solo onde a espécie foi plantada (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Em ensaio de compressão paralela às fibras uma carga é aplicada no eixo longitudinal na madeira, sendo um parâmetro importante para elementos estruturais, pois não se rompe drasticamente, podendo ser indicada ou não para tal finalidade (SILVA et al., 2012).

A dureza Janka é um método padrão utilizado para madeira, baseado na força requerida pelo carregamento estático de uma esfera de aço para penetrar na superfície da madeira (GREEN et al., 2006), especificada pela norma ASTM D143 como a carga ( $H$ ) em uma certa penetração (KLOIBER et al., 2015). Marchesan (2016) ressaltou a importância da dureza da madeira para ensaios de simulação de piso em serviço, salientando que esta propriedade apresenta relação com a

qualificação da madeira para produção de pisos, assim como a densidade básica e estrutura anatômica.

Trabalhos mais recentes forneceram orientações e informações gerais sobre a previsão das propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos não destrutivos (MELO e DEL MENEZZI, 2016; GAFF et al., 2017), haja vista que tais métodos apresentam rapidez e praticidade na obtenção da informação, além de possibilitar aplicações de correlações entre os resultados destes ensaios e propriedades mecânicas da madeira (CARVALHO et al., 2017). Um destes métodos é a técnica do *stress wave timer* (SWT), eficiente para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico, diretamente relacionado com a resistência da madeira (FREITAS et al., 2016).

Deste modo, as informações das propriedades da madeira bem como conhecimento de sua variação são diretamente utilizadas para classificar a madeira quanto à sua utilização e comercialização (EVANGELISTA et al., 2010).

## 1.5 TRATAMENTOS COM TEMPERATURA NA MADEIRA

Tratamentos que usam a temperatura na madeira ou térmicos são processos de aplicação de calor com o objetivo de modificar a estrutura da madeira de modo a melhorar o desempenho em uso, alterando a composição química e, conseqüentemente, alterando as propriedades em função do processo aplicado (DEL MENEZZI, 2004). Assim, quando a madeira é aquecida, ocorrem mudanças na natureza de seus componentes (celulose, hemicelulose, lignina e extrativos), o que pode modificar sua higroscopicidade, estabilidade e permeabilidade (HILLIS, 1984).

Inúmeros tipos de tratamentos foram desenvolvidos para alterar as características comportamentais da madeira. Em 1936, Kollmann desenvolveu um processo chamado *Lignostone*, usando calor e pressão para densificar a madeira e na mesma época, na Alemanha, foi desenvolvido um processo semelhante, denominado *Lignifol*.

Na década de 1940 foi desenvolvido ainda os processos *Staypack* e *Staybwood*, utilizando madeiras mais leves sem densificação, com o intuito de apenas melhorar a estabilidade dimensional e a higroscopicidade. Estes processos não tiveram aplicação em larga escala, provavelmente pela grande disponibilidade de madeiras consideradas nobres naquele período (ESTEVES e PEREIRA, 2009).



Atualmente, tratamentos que usam temperatura (têrmicos) são largamente aplicados na indústria de produtos florestais, tais como: Processo de Plato® (*Proving Lasting Advanced Timber Option*); Processo *Retification*®; Processo *Le Bois Perdure* (Perdure®); Processo de tratamento óleo quente (OHT); Processo *Thermowood*® (MILITZ, 2002) e o processo *VAP HolzSysteme*® (BATISTA, 2012). Demais tratamentos, como termomecânicos e termo-hidro-mecânicos têm sido amplamente estudados e aplicados para melhorar as propriedades da madeira (DIOUF et al., 2011; FANG et al., 2012a; BEKHTA et al., 2012; CANDAN et al., 2013).

As madeiras tratadas termicamente adquirem uma coloração escura, semelhante a algumas madeiras tropicais, considerada como uma vantagem estética para algumas aplicações (MITSUI et al., 2001; BEKHTA e NIEMZ, 2003). Esta alteração de cor agrega valor à madeira tratada (ESTEVES et al., 2007), justificando a aplicação em escala industrial, principalmente na Europa (SANDBERG et al., 2013). A aplicação em escala industrial, segundo Boonstra (2008), justifica-se pela falta de madeiras duráveis no mercado, bem como a demanda por materiais sustentáveis de origem controlada e às restrições na aplicação de produtos químicos tóxicos na madeira.

O interesse em estudos com tratamentos têrmicos aumentou após observações de aspectos positivos na madeira, como modificação de cor, menor higroscopicidade e maior estabilidade após secagem a altas temperaturas (SANDOVAL-TORRES et al., 2010; FANG et al., 2011). AYADI et al. (2003) evidenciaram que a madeira tratada termicamente apresenta maior homogeneidade de cor com a ação do tempo em comparação à madeira não tratada, o que para Zauer et al. (2016) é um efeito colateral do tratamento têrmico aceitável, uma vez que torna a madeira mais escura, aumentando o valor econômico de espécies de cor clara após o tratamento têrmico (MILITZ e ALTGEN, 2014; SANDBERG e KUTNAR, 2016).

Demais características da madeira são alteradas com aplicação de tratamento com temperatura, nomeadamente a resistência biológica, propriedades físicas e mecânicas, umidade de equilíbrio e alteração estética superficial (XING et al., 2016). Além destas alterações citadas, Cademartori et al. (2013) citam que os tratamentos têrmicos até 220°C alteram também as propriedades químicas da madeira, resultando em elevação da hidrofobicidade.

Tratamentos térmicos com temperaturas entre 95°C e 320°C resultam em um material com menor higroscopicidade e conseqüentemente com maior estabilidade dimensional e teor de umidade de equilíbrio reduzida. Porém, normalmente ocorre uma perda de massa do material e uma redução de sua resistência mecânica devido à alteração química que ocorre na madeira durante o tratamento (ALTGEN et al., 2015; SANDAK et al., 2015; HERRERA et al., 2018a).

Por alterar negativamente as propriedades mecânicas, madeiras tratadas termicamente não são indicadas para uso estrutural, pois ocorrem reduções na faixa 10 a 30% da sua resistência (BAKAR et al., 2013). Estas modificações variam em função dos parâmetros temperatura, tempo e condição atmosférica utilizados no tratamento (ZAUER et al., 2016).

Temperaturas até 150°C eliminam a água da madeira, realizando a secagem da mesma e na amplitude térmica usada em processos térmicos (180°C – 250°C) ocorrem as modificações significativas na madeira e acima desta faixa inicia-se a carbonização da mesma (ESTEVES e PEREIRA, 2009).

Sundqvist (2004) descreve as fases de modificações dos componentes químicos da madeira em função da temperatura, para celulose e lignina ocorrem de forma significativa acima de 220°C; hemiceluloses a partir de 150°C e extrativos acima de 100°C. Porém a transição pode iniciar abaixo destas temperaturas, ocorrendo alterações e degradação dos componentes da madeira na faixa de 150°C a 250°C. A degradação das hemiceluloses é considerada mais acentuada a partir de 190°C, já para a celulose inicia acima de 220°C, quando sua parte cristalina passa a ser alterada (KACIKOVA et al., 2013).

As alterações na madeira estão normalmente ligadas ao comportamento viscoelástico dos polímeros hemicelulose e lignina (BORST et al., 2013). Este comportamento está associado à transição vítrea (T<sub>g</sub>) dos polímeros, os quais passam de um estado desordenado rígido para um desordenamento maior quando submetidos a altas temperaturas, onde as cadeias poliméricas possuem maior mobilidade e no caso da celulose, hemiceluloses e lignina, o comportamento torna-se menos rígido devido à degradação dos mesmos, a qual ocorre em faixas de temperatura de 200°C a 250°C para celulose, 150°C a 220°C para hemicelulose e acima de 205°C para a lignina (FIGUEROA e MORAES, 2009; PAULA et al., 2014).

Há na literatura algumas divergências de valores, por exemplo, USDA (1999) cita a temperatura de transição vítrea da lignina em torno de 170°C e acima desta

temperatura pode-se moldar a lignina mantendo a deformação após resfriamento. A temperatura de 170°C é descrita como a temperatura de transição da fase vítrea para a fase elástica, porém pode variar conforme a espécie e teor de umidade da madeira (DEL MENEZZI, 2004; ARRUDA, 2012).

Del Menezzi (2004) cita que com o aumento da temperatura acima da transição vítrea os polímeros da madeira apresentam menor resistência à deformação, ocorrendo a liberação das tensões internas da madeira. Hill (2006) menciona que o tratamento térmico é tipicamente realizado em temperaturas que variam de 180°C a 260°C, e que temperaturas mais baixas não causam mudanças significativas nos constituintes da madeira, enquanto temperaturas mais altas degradam severamente a madeira.

Esteves e Pereira (2009) relatam processos industriais com temperaturas de tratamentos entre 160°C e 260°C e Alvira et al. (2010) indicam temperaturas na faixa de 160°C a 240°C para que ocorram mudanças na estrutura química e hidrólise dos polímeros da parede celular. Recentemente, métodos térmicos, termo-higro-mecânicos e termomecânicos aplicados à madeira e produtos à base de madeira intensificaram-se com o intuito de melhorar suas propriedades, especialmente em espécies de baixa densidade (BEKHTA et al., 2009; DIOUF et al., 2011; RAUTKARI et al., 2011; NAVI e SANDBERG, 2012).

## 1.6 ALTERAÇÕES SUPERFICIAIS E ESTÉTICAS

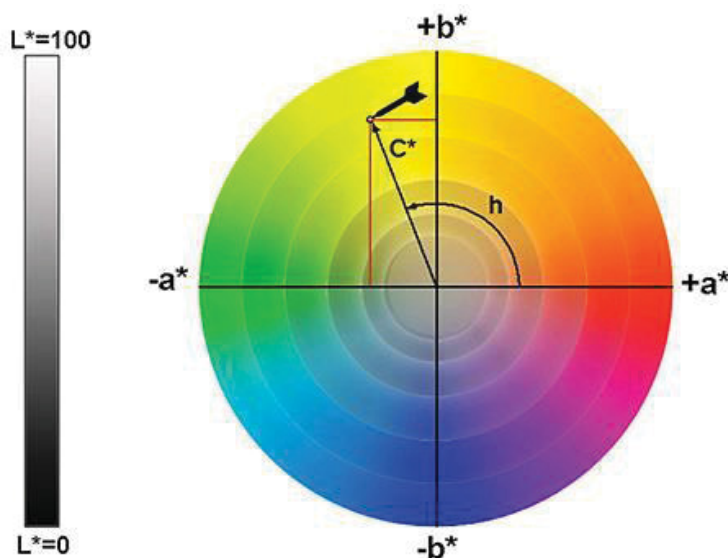
Estruturalmente, os tratamentos que usam temperatura causam alterações na parede celular da madeira, degradando as hemiceluloses, alterando a lignina, remanejando os extrativos, aumentando a proporção de celulose cristalina e reduzindo os grupos hidrofílicos de hidroxila (-OH), o que leva a modificações na madeira, como na higroscopicidade e cor (KOL, 2010; MAHNERT et al., 2013).

Normalmente a madeira mostra-se mais hidrofóbica após um processo de modificação que usa temperatura e pode ser uma vantagem ou desvantagem, dependendo de sua aplicação (HAKKOU et al., 2005), pois quando a superfície torna-se mais hidrofóbica a absorção de colas ocorre de forma mais branda, normalmente em tratamentos com temperatura acima de 200°C (ESTEVES e PEREIRA, 2009).

A parede celular adsorve menos água após tratamento com temperatura devido à redução de grupos hidroxila, reduzindo os efeitos de inchamento e retração da madeira (GÜNDÜZ et al., 2008; HERRERA et al., 2018a), possibilitando o uso em ambientes com certo teor de umidade (SANDBERG et al., 2013; GÉRARDIN, 2016).

Além da redução da higroscopicidade ocorre a alteração de cor da madeira, sendo possível obter diferentes tons colorimétricos de acordo com o processo utilizados (SCHNABEL et al., 2007). Para determinar a cor é possível utilizar o sistema CIELAB (FIGURA 2), originado da Comissão Internacional de l'Éclairage, que se baseia em três eixos para tal determinação: 1) luminosidade ( $L^*$ ) de 0% (preto) e 100% (branco); 2)  $a^*$  de verde (-a) para vermelho (+ a); 3)  $b^*$  de azul (-b) amarelo para (+ b) (GONZALEZ-PENA e HALE 2009; TODOROVIC et al., 2012).

FIGURA 2 - SISTEMA DE COORDENADAS DE CORES CIELAB 1976



FONTE: Quantotec. Disponível em: <http://www.quantotec.com/sp/Colorimetria.htm>

Para o mercado consumidor a coloração da madeira pode ser um fator decisivo para escolha de compra e uso, devido a sua aparência visual (ESTEVES e PEREIRA, 2009), além da atribuição de maior valor a madeiras com tons escuros em relação a madeiras mais claras em alguns mercados (HERRERA et al., 2018b).

Os tons mais escuros obtidos em processos com a ação da temperatura devem-se, principalmente, à oxidação de compostos fenólicos (WAHYU et al., 2015), formação de compostos secundários, migração de extrativos à superfície e degradação das hemiceluloses (KOCAEFE et al., 2008a; CADEMARTORI et al.,

2014a; TOMAK et al., 2014). Sendo assim, temperaturas mais elevadas ocasionam maiores alterações na cor, considerado por Bekhta et al., (2014b), o fator mais influente em processos de densificação.

Amostras de madeira modificada por processos térmicos apresentam outras vantagens, especialmente quando submetida à fotodegradação, por exemplo, a estabilidade da cor, superfície homogênea e menor degradação quando comparada a peças não tratadas termicamente (SRINIVAS et al., 2012; YILDIZ et al., 2013; XING et al., 2015; SHEN et al., 2016). Entretanto Tomak et al. (2018) salientam que submeter peças modificadas termicamente a ambientes externos por longos períodos pode não apresentar uma proteção eficiente quanto à aparência superficial e manutenção de cor.

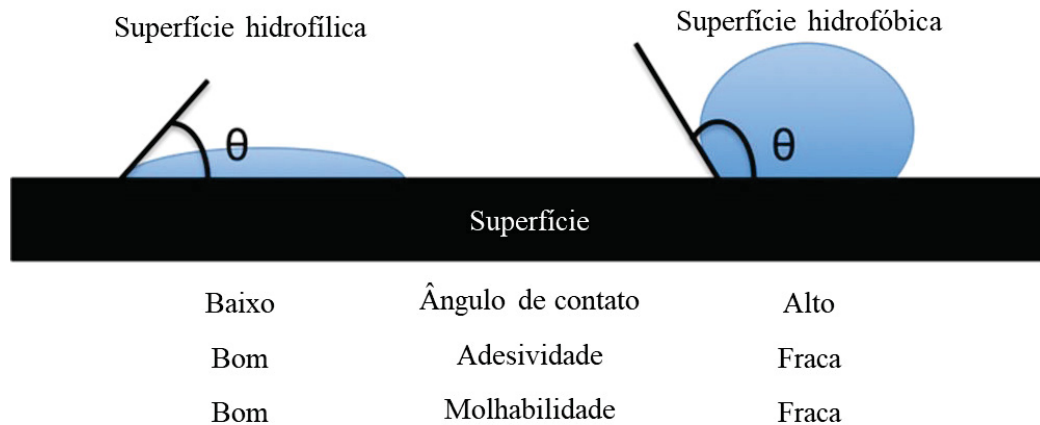
Outra característica superficial afetada é a rugosidade, pois materiais diferentes apresentam superfícies compostas por picos e vales em miniatura diferentes e a distribuição dimensional e de área desses picos e vales, afeta as propriedades da superfície (BUDAKÇI et al., 2013).

A rugosidade pode ser minimizada após processos termomecânicos (BEKHTA et al., 2012), tornando a superfície lisa, ou seja, menos rugosa, essencial para uma aparência agradável, pois a aplicação de acabamentos acentua qualquer irregularidade da rugosidade na superfície (WILLIAMS, 2010). Ademais, há uma redução de até 50% da quantidade de verniz aplicado sobre a superfície comprimida termicamente (BEKHTA et al., 2018).

Valores de rugosidade foram significativamente reduzidos em madeira de *Alnus glutinosa* Goertn., *Fagus sylvatica* L., *Betula verrucosa* Ehrh. e *Pinus sylvestris* L., além de proporcionar aumentos do brilho superficial, conforme há o aumento da pressão e temperatura em processo de densificação (BEKHTA et al., 2014b). Estas propriedades são importantes para a utilização da madeira, especialmente quando aplicados revestimentos transparentes, agregando valor estético e econômico, uma vez que estes parâmetros são usados para avaliar a qualidade dos produtos acabados de madeira (BEKHTA et al., 2018).

Associada à rugosidade está a molhabilidade, que afeta a qualidade superficial dos materiais lignocelulósicos e indica a forma de espalhamento ou absorção do fluido na superfície (FIGURA 3), sendo medida pelo método do ângulo de contato da interação física entre a superfície da madeira e a água (GUPTA et al., 2007; JARUSOMBUTI e AYRILMIS, 2011; RAABE et al., 2017).

FIGURA 3 - COMPORTAMENTO DA SUPERFÍCIE AO ÂNGULO DE CONTATO



FONTE: Modificado pelo autor (2018).

Superfícies com ângulos de contato correspondente a  $0^\circ$  têm molhabilidade completa; superfícies com valores de ângulo finito são parcialmente molháveis e uma superfície totalmente hidrofóbica tem um ângulo de  $180^\circ$  (DALTIM, 2011). A molhabilidade completa ocorre quando o líquido reveste uniformemente a superfície sólida, formando um filme fino onde o ângulo ( $\theta$ ) é igual a zero (0); molhabilidade parcial ocorre quando  $\theta > 0$ ; e a não molhabilidade, quando  $\theta$  for maior ou igual a  $90^\circ$  (STAMM, 2008).

Quando aplicados tratamentos térmicos até  $200^\circ\text{C}$  a molhabilidade é reduzida, influenciada pelo tempo de tratamento, tipo de amostra e plano da madeira (SANTOS et al., 2012). Em processos termomecânicos o ângulo de contato é mais influenciado pela temperatura do que pela pressão, deixando a superfície mais hidrofóbica (BEKHTA e KRYSTOFIAK, 2016).

### 1.7 DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA

A madeira como um biopolímero composto natural renovável apresenta algumas vantagens para aplicações industriais, tais como a disponibilidade e fácil acesso, alta relação resistência/peso, flexibilidade, facilidade de processamento, leveza, capacidade de reutilização, entre outras. Todavia algumas desvantagens também são notáveis e para obter a funcionalidade desejada o material pode ser transformado, minimizando os efeitos indesejados (NAVI e SANDBERG, 2012).

A densificação trata-se de um método de transformação para alterar mecanicamente as propriedades da madeira (GRAFF et al., 2016). Kutnar e Sernek (2007) salientam que a madeira pode ser densificada através de três processos: compressão utilizando pressão; aplicação de produtos químicos impregnantes e resinas na parede celular; e a combinação das duas técnicas. As aplicações destes processos dão origem a produtos de madeira com densidades superiores ao material original (KAMKE, 2006).

No entanto, o uso de produtos químicos por impregnação na madeira afeta as características naturais da mesma, além de apresentar alto custo e não ser ambientalmente sustentável (HEGER et al., 2004). Já a aplicação de resinas pode deixar a parede celular mais frágil (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Por outro lado, no processo fundamentado em compressão, a madeira retoma suas dimensões iniciais antes de ser comprimida quando exposta a ambientes com alta umidade (BLOMBERG et al., 2006; PELIT et al., 2014), efeito este denominado “*springback*”, que é a recuperação de forma original ou efeito de mola (HEGER et al., 2004; KAMKE, 2006).

O desafio para a utilização do processo de compressão mecânica está em fixar o novo formato da madeira, eliminando ao máximo a recuperação da espessura de madeira após a densificação, ocasionado pela liberação de tensões elásticas e viscoelásticas (KAMKE e KUTNAR, 2010). Para minimizar este efeito o processo termomecânico pode ser uma alternativa de sucesso, o qual alia compressão mecânica com tratamento térmico, objetivando produzir materiais com maior estabilidade dimensional, minimizando a interferência nas propriedades mecânicas (ARRUDA, 2012).

O processo de densificação termomecânico pode ser compreendido a partir da descrição de quatro etapas: 1) amolecimento da parede celular; 2) compressão da madeira amolecida; 3) estabilização do novo formato por resfriamento e secagem; 4) fixação do novo formato (MORSING e HOFFMEYER, 1998).

O processo de transformação da madeira, combinando compressão e temperatura, é conhecido como “*staypack*” (SEBORG et al., 1945; STAMM et al., 1946). Tal procedimento consiste em utilizar amostras de madeira com teor de umidade inferior a 15%, depositadas entre placas aquecidas a 140°C de uma prensa hidráulica e comprimidas na direção radial com uma força de até 24MPa, durante duas horas (SKYBA, 2008). O autor ressalta que as propriedades mecânicas e

físicas da madeira são melhoradas, porém pode ocorrer a recuperação parcial ou total da forma original da madeira (*springback*).

O efeito “*springback*” na madeira densificada pode ser minimizado ou até mesmo eliminado, utilizando métodos de pós-tratamento. Aplicação de temperaturas elevadas, entre 180 a 240°C, por meio de vapor saturado, com ou sem pressão, em sistema fechado ou aplicação de óleo quente após densificação, melhora eficientemente a estabilidade dimensional e reduz a recuperação em espessura da madeira (GONG et al., 2010; FANG et al., 2011; FANG et al., 2012b).

Além da estabilização do material, estudos indicam que as propriedades mecânicas da madeira densificada são melhoradas com aplicação de pós-tratamentos (GONG et al., 2010; FANG et al., 2012a; RAUTKARI et al., 2013).

A temperatura mais adequada, para elevar a resistência à flexão (42%), resistência ao cisalhamento (20%), e a resistência à compressão (47%), é de 120°C para madeira *Pinus sylvestris* e temperaturas superiores podem reduzir as propriedades de resistência, devido à degradação química (ULKE et al., 2012). Pelit et al. (2014) verificaram aumento da dureza da madeira, radial e tangencial, após a densificação de madeiras de pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris*) e faia (*Fagus orientalis*) com temperaturas entre 110°C e 150°C.

Ao utilizar temperaturas acima de 150°C, outros autores reforçam que ocorre a hidrólise das hemiceluloses, fragilizando a madeira, reduzindo algumas propriedades mecânicas, especialmente rigidez e resistência (KOCAEFE et al., 2010; NAVI e SANDBERG, 2012). Para não afetar significativamente as propriedades mecânicas são necessários tratamentos com compressão com o mínimo de fraturas na parede celular. Para isto utilizam-se tratamentos de densificação termomecânicos com a presença de umidade na madeira, favorecendo o amolecimento dos polímeros viscoelásticos da mesma (COSTA, 2015).

Quanto maior a pressão utilizada no tratamento térmico, maior a capacidade de absorção de água e inchamento das peças tratadas (UNSAL et al., 2009). Além disso, o efeito “*springback*” apresenta uma relação direta com o nível de pressão aplicado do que com a temperatura utilizada.

Comportamento semelhante foi observado por Unsal et al. (2011) em peças de *E. camaldulensis*, tratadas a 130°C e 150°C com várias pressões, onde a aplicação de cargas mais altas, com mesma temperatura, elevaram o inchamento da madeira. Deste modo, os autores salientam que não é necessária a aplicação de



pressões elevadas para obter melhorias na estabilidade dimensional da madeira, necessitando estudos com combinações de pressão e temperatura, com intuito de melhorar as propriedades da madeira.

Costa e Del Menezzi (2017) pesquisaram a aplicação do processo de densificação termomecânica em compensado de madeira de baixa densidade, resultando no aumento da resistência de flexão de até 51,8%. No mesmo sentido, Coelho et al. (2017) concluíram que o processo de densificação termomecânica melhora a resistência à abrasão da madeira. Complementando, Costa e Del Menezzi (2017) afirmam que o processo termomecânico é um procedimento para transformar madeiras moles e porosas em madeiras com densidades elevadas, as quais podem ser utilizadas em situações onde maior resistência seja necessária.

Na indústria de painéis, prensas contínuas processam o material continuamente à medida que ele se move pela máquina, com pressão ou espessura específica, com variação mínima durante a produção para alcançar a compactação desejada com um sistema de controle de espessura hidráulico especializado (SADATNEZHAD et al., 2017). Os autores citam o uso de uma prensa contínua marca Siempelkamp A0361 (G. Siempelkamp GmbH & Co. KG, Krefeld, Alemanha) com comprimento total da prensa de 18m, com uma zona de prensagem de 6m. Isto evidencia que é possível densificar madeira de baixa densidade usando a prensa contínua, que é normalmente usada para a fabricação de painéis particulados.

A densificação aplicada em escala industrial ainda está em fase inicial mundialmente, entretanto Wehsener et al. (2018) testaram a utilização do processo de densificação termomecânica associado a modificação térmica em escala industrial. Os autores utilizaram amostras com dimensões de 2000 x 110 x 40mm (comprimento x largura x espessura) aplicado na empresa DEHONIT GmbH & Co. KG, Kirchhundem, Alemanha, em uma prensa com placas aquecidas de 2000 por 1200mm, concluindo ser um processo viável.

Nesse sentido, Pertuzzatti et al. (2018) citam que a América do Norte e a Europa já consideram os processos de densificação como um bom método para melhorar as propriedades de espécies de baixa densidade. Porém, os autores afirmam que na América do Sul e conseqüentemente no Brasil o processo carece de estudos com espécies variadas, avaliações das modificações e aplicações industriais.

## **CAPÍTULO 2: RENDIMENTO E SECAGEM DA MADEIRA**

### **1 INTRODUÇÃO**

O rendimento em madeira serrada e o comportamento da mesma durante e posteriormente ao processo de desdobro são parâmetros importantes para conhecimento do desempenho e potencial de uso da espécie. Os parâmetros que podem influenciar na etapa de desdobro e após este processo estão associados às características intrínsecas da espécie, como as tensões de crescimento, bem como de agentes externos, como tratamentos silviculturais. A associação destas características pode afetar o desempenho no processo de desdobro e o comportamento na secagem da madeira.

Técnicas de desdobro são aplicadas para a obtenção de maior percentual em madeira serrada, mas também com o objetivo de obtenção de peças com maior estabilidade, com aspecto visual diferenciado e até mesmo com o intuito de evitar algumas partes da madeira, como por exemplo, a área medular. Em termos produtivos, quanto maior o rendimento maior será a rentabilidade econômica e por isso, costumeiramente, a produção em larga escala alia eficiência operacional com rendimento elevado, reduzindo os custos de produção.

A técnica de desdobro deve ser adequada à classe diamétrica utilizada, de modo a aperfeiçoar o rendimento em madeira serrada, reduzindo perdas, sendo indicado o desdobro do tipo tangencial para toras de diâmetros inferiores a 33cm, pois aliam eficiência com rendimento (CARVALHO et al., 2019b). Este tipo de desdobro propicia a obtenção de produtos com larguras maiores e comprimentos mais homogêneos quando comparado ao desdobro do tipo radial (ROCHA, 2000; CUNHA et al., 2015a).

Porém, peças tangenciais merecem maior atenção no momento da secagem, em função de sua menor estabilidade dimensional, o que pode acarretar em defeitos na madeira durante a perda de umidade.

A redução da umidade durante a secagem é uma fase primordial para aplicação apropriada da madeira, consistindo em um fator essencial após o processamento. A secagem natural é uma alternativa onde a madeira perde água na forma de vapor até entrar em equilíbrio com a umidade do ar local, denominado como teor de equilíbrio higroscópico (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968). Este equilíbrio

higroscópico pode variar conforme a localização geográfica e condições climáticas, condicionando a umidade final da madeira. Com o processo de remoção de água da madeira deseja-se reduzir o teor de umidade com minimização dos custos e maximização da qualidade da madeira, ou seja, trata-se de um processo complexo que preconiza a otimização do produto final madeira, com características aceitáveis para a emprego desejado.

A secagem ao ar livre é um método de baixo custo, porém exige um tempo maior em relação a métodos artificiais, além de apresentar teor de umidade final da madeira limitado para algumas aplicações. A redução da umidade da madeira, pela secagem ao ar, é influenciada pelas condições ambientais e características da espécie.

Portanto, estudar o comportamento de espécies submetidas a secagem ao ar ou natural é uma técnica acessível e compatível com realidades regionais onde não há recursos e equipamentos disponíveis para a secagem da matéria-prima. Além do mais, obtêm-se informações da compatibilidade do método com a conduta da espécie sob tais condições.

Diante disso, o presente capítulo aborda o rendimento em madeira serrada de *Gmelina arborea* em três classes diamétricas e o comportamento da secagem natural através da curva e taxa de secagem.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE COLETA E OBTENÇÃO DO MATERIAL

As árvores foram obtidas de uma área experimental de floresta pertencente à empresa Foz do Chopim Energética Ltda (25°34'17.8"S - 53°07'20.9"W) localizada no município de Cruzeiro do Iguaçu – PR. O clima do local é classificado como subtropical úmido (Cfa) segundo Köppen, com temperatura média de 18,4°C (mínima de 2,1°C e máxima de 34,1°C) e pluviosidade média anual de 1920mm.

Foram selecionadas seis árvores que apresentavam fuste reto, sem defeitos aparentes de sanidade, de fácil derrubada e representativa da espécie (FIGURA 4).

FIGURA 4 - INDIVÍDUO DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A) detalhe do fuste; B) circunferência a altura do peito.

Toras com 2,20m de comprimento foram utilizadas para retirada de tábuas e pranchas para análise de rendimento, secagem e confecção de amostras para o processo de densificação termomecânica da madeira.

## 2.2 DESDOBRO E RENDIMENTO DA MADEIRA SERRADA

As toras seccionadas em 2,20m de comprimento foram divididas em três classes diamétricas com seis toras por classe. Para isso, foi medido o comprimento da tora e nas duas extremidades (ponta fina e ponta grossa), as circunferências (cm) com auxílio de fita métrica e transformada em diâmetro (cm) para posterior cálculo de volume, conforme EQUAÇÃO 1 e classificação diamétrica (TABELA 1).

$$V \text{ Tora} = \frac{\pi}{40000} \times \left( \frac{D1+D2}{2} \right)^2 \times C \quad (1)$$

Em que:

V Tora = volume da tora (m<sup>3</sup>);

D1 = diâmetro da ponta fina (cm);

D2 = diâmetro na ponta grossa (cm);

C = comprimento da tora (m).

TABELA 1 – CLASSES DIAMÉTRICAS DAS TORAS DE *Gmelina arborea*

Classe diamétrica	Diâmetro médio da tora (cm)
1	< 19,0
2	19,1 - 24,9
3	> 25,0

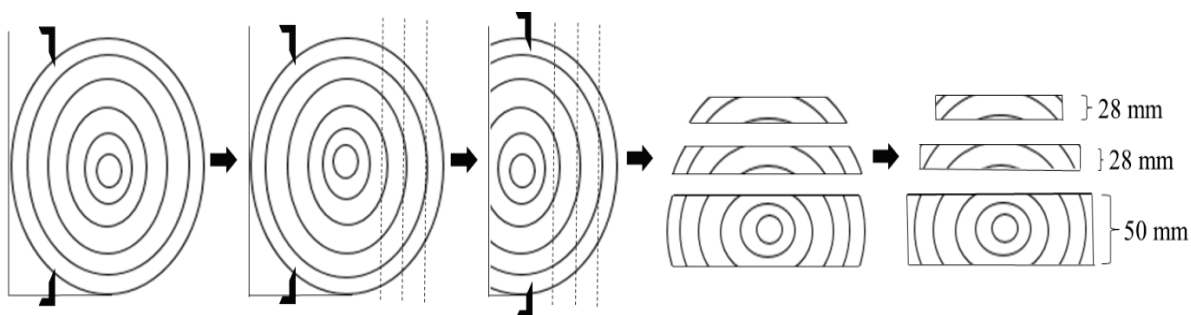
FONTE: O autor (2020).

O desdobro da madeira foi realizado em serraria dotada de uma serra de fita vertical simples com volantes de 800mm de diâmetro, movida com motor de 30CV de potência. Foram realizados cortes tangenciais paralelos ao eixo longitudinal da tora ou modelo de desdobro do tipo tangencial convencional.

Inicialmente retirou-se a costaneira e em seguida tábuas com 28mm de espessura. Posteriormente, a tora foi girada em 180° e realizado o mesmo processo até restar a prancha central com 50mm de espessura (FIGURA 5).

Com isso, obtiveram-se peças com dois tipos de espessura (28mm e 50mm). O refilo das tábuas foi realizado em uma serra circular, obtendo peças com larguras variadas e comprimentos em função da extensão da tora.

FIGURA 5 – MODELO DE DESDOBRO TANGENCIAL APLICADO EM TORAS DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

Depois de serradas, as peças procedentes de cada tora foram separadas para cálculo individual do volume de madeira serrada por tora e posterior somatório das peças oriundas de cada tora, conforme EQUAÇÕES 2 e 3.

$$V_{\text{peça}} = L_p \times E \times C \quad (2)$$

$$V_{\text{ms}} = \sum V_{\text{peça}} \quad (3)$$

Em que:

$V_{\text{peça}}$  = volume de cada peça ( $\text{m}^3$ );

$L_p$  = largura da peça (m);

$E$  = espessura da peça (m);

$C$  = comprimento da peça (m);

$V_{\text{ms}}$  = volume de madeira serrada ( $\text{m}^3$ ).

Para cálculo de rendimento bruto foi utilizada a EQUAÇÃO 4, a qual leva em consideração o volume de madeira serrada e o volume da tora.

$$RB (\%) = \frac{V_{\text{ms}}}{V_{\text{Tora}}} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

$RB$  = rendimento bruto (%);

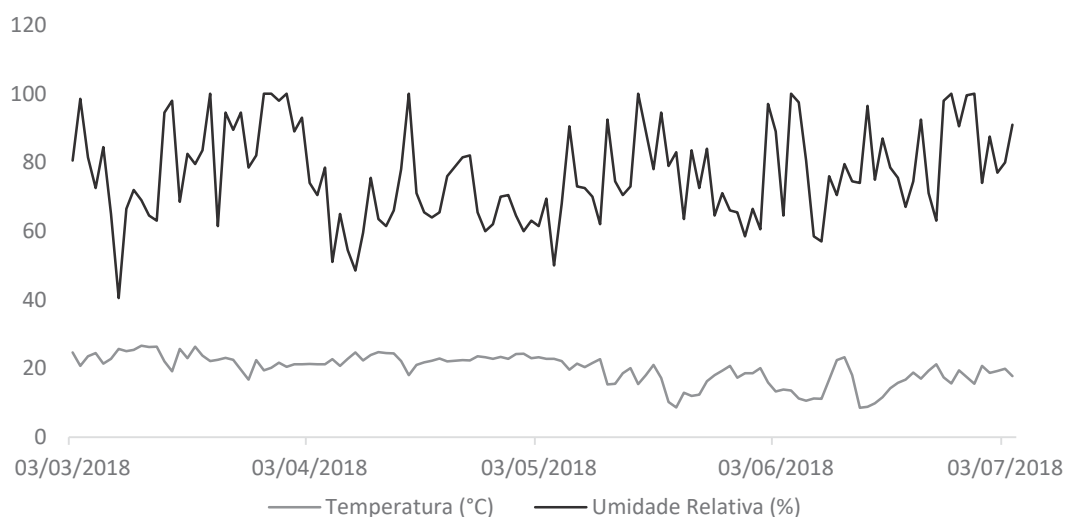
$V_{\text{ms}}$  = volume de madeira serrada ( $\text{m}^3$ );

$V_{\text{Tora}}$  = volume da tora ( $\text{m}^3$ ).

### 2.3 SECAGEM AO AR LIVRE

A pilha de tábuas para secagem ao ar livre foi montada no campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), no município de Dois Vizinhos, estado do Paraná, Brasil. O local de motagem era plano, com boa drenagem e sem obstáculos à ventilação, com altitude média de 500m. Durante o período da secagem a temperatura média mínima e máxima foram respectivamente 8,8°C e 26,6°C, com umidade relativa do ar entre 40,5% e 100% (FIGURA 6), precipitação total de 448mm e velocidade média do vento de 1,83m/s.

FIGURA 6 – VARIAÇÃO LOCAL DA UMIDADE RELATIVA DO AR E TEMPERATURA NO PERÍODO DA SECAGEM



FONTE: Adaptado de INMET (2020).

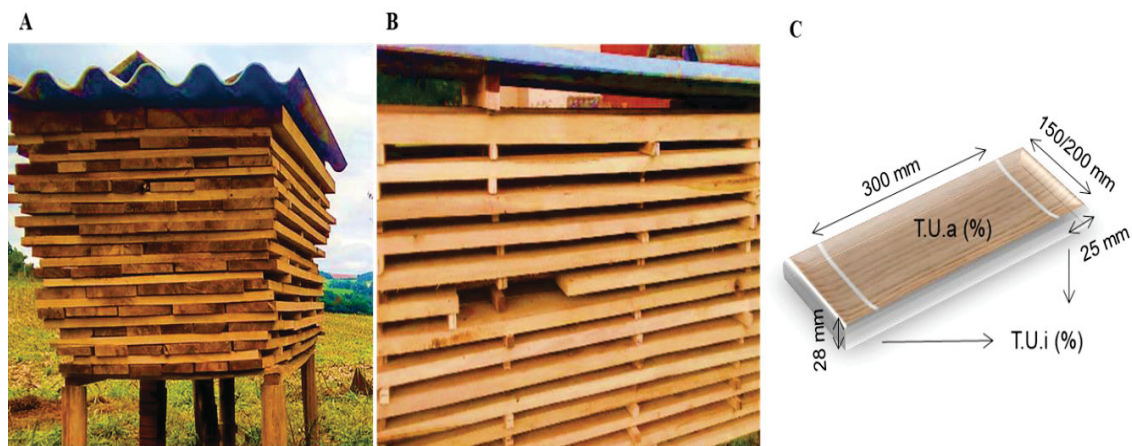
Na pilha de secagem as tábuas foram alocadas sobre estruturas de madeira apoiadas em uma fundação de moirões de eucalipto e tijolos, elevados a 50cm do solo. A pilha de secagem foi orientada no sentido norte-sul de forma que o comprimento da pilha permaneceu perpendicular aos ventos dominantes.

A disposição da carga de madeira foi constituída de 12 camadas com tábuas, utilizando cinco fileiras de tabiques separadores equidistantes, com dimensões de 25 × 25 x 100mm, espessura, largura e comprimento, respectivamente, em posição perpendicular às tábuas, individualizando as camadas.

Além dessas, foi colocado uma camada superior de pranchas adicionais sobre as tábuas e peso de concreto sobre a cobertura de telhas, com a função de

impor restrição mecânica à pilha. A pilha foi coberta com duas telhas de fibrocimento, com seis mm de espessura, levemente inclinadas, de modo a minimizar a incidência de raios solares e acúmulo de precipitações (FIGURA 7).

FIGURA 7 - PILHA DE SECAGEM AO AR LIVRE DE *Gmelina arborea* E AMOSTRA CONTROLE



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A) vista frontal; (B) vista lateral com local para amostra de controle; (C) detalhe de amostra controle.

Para a caracterização das condições climáticas durante a secagem ao ar, procedeu-se à obtenção dos dados junto à Estação Meteorológica de Superfície Automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situada a aproximadamente 600m do local onde a secagem foi conduzida.

O monitoramento do teor de umidade da madeira durante a secagem foi realizado por meio de cinco amostras de controle com dimensões de 28 × 150 × 300mm e 28 x 200 x 300mm (espessura, largura e comprimento). Antes do início do processo de secagem, determinou-se o teor de umidade inicial de cada amostra de controle, mediante a média aritmética de duas seções obtidas das extremidades de cada amostra de controle, conforme EQUAÇÃO 5.

$$TUi = \frac{MU-MS}{MS} * 100 \quad (5)$$

Em que:

TUi = teor de umidade da amostra (%)

MU = massa úmida da amostra (g);

MS = massa seca da amostra (g).



As amostras de controle foram alocadas em locais de fácil remoção e reposição, visando uma medição real e representativa do teor de umidade da pilha, com pesagens periódicas para controle do teor de umidade, conforme EQUAÇÃO 6.

$$TUa = \frac{Ma(TUi+100)}{Mi} - 100 \quad (6)$$

Em que:

TUa = teor de umidade da amostra de controle (%);

Ma = massa atual da amostra de controle (g);

TUi = teor de umidade inicial da amostra de controle (%);

Mi = massa inicial da amostra de controle (g).

Obtidos os dados referentes a redução do teor de umidade da madeira, foram calculadas as taxas de secagem em três situações (Verde – Ponto de Saturação das Fibras (PSF) / PSF – Umidade de Equilíbrio (UE) / Verde – UE), através da EQUAÇÃO 7:

$$TS = \frac{TUi - TUf}{t} \quad (7)$$

Em que:

TS = taxa de secagem (% U dia<sup>-1</sup>);

TUi = teor de umidade inicial (%);

TUf = teor de umidade final (%);

t = tempo decorrido (dias).

De posse dos dados de teor de umidade das amostras de controle foi elaborada a curva de secagem da madeira em função do tempo de exposição. As umidades de equilíbrio (UE) no decorrer do período foram obtidas utilizando as EQUAÇÕES 8, 9, 10 e 11, descritas por JANKOWSKY (1985).

$$UE = \left( \frac{K_1 K_2 h}{1 + K_1 K_2 h} + \frac{K_2 h}{1 - K_2 h} \right) * \frac{1800}{W} \quad (8)$$

$$K_1 = 4,737 + 0,04773(T) - 0,00050123(T)^2 \quad (9)$$

$$K_2 = 0,70594 + 0,001698(T) - 0,000005553(T)^2 \quad (10)$$

$$W = 223,374 + 0,69309(T) + 0,01850(T)^2 \quad (11)$$

Em que:

T = temperatura em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ );

h = umidade relativa/100.

A equação da umidade de equilíbrio (UE) originalmente formulada por SIMPSON (1991) utiliza os fatores  $K_1$ ,  $K_2$  e W com temperatura em graus Fahrenheit, os quais foram alterados para a utilização em graus Celsius.

## 2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Previamente a análise estatística de rendimento em madeira serrada os dados foram verificados quanto à homogeneidade da variância (Bartlett e Hartley's) e normalidade (Kolmogorov – Smirnov). Posteriormente realizou-se análise de variância (ANOVA –  $p \leq 0,05$ ) e verificada diferença significativa procedeu-se com o teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação de médias.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 RENDIMENTO EM MADEIRA SERRADA DE *Gmelina arborea*

O rendimento bruto em madeira serrada apresentou aumento com o incremento em diâmetro das toras, sendo maior na classe de maior diâmetro (TABELA 2).

TABELA 2 – RENDIMENTO EM MADEIRA SERRADA DE *Gmelina arborea* EM TRÊS CLASSES DIAMÉTRICAS

Classe diamétrica (Ø médio)	Rendimento (%)	Coefficiente de variação (%)
1 (16,5cm)	48,16 a	14,96
2 (21,5cm)	51,74 ab	11,68
3 (27,3cm)	58,64 b	10,05
Média geral	52,82	12,23

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Letras diferentes na mesma coluna significam diferença estatística pelo teste de Tukey (95% de probabilidade).

O rendimento médio obtido para a espécie foi entre 45 e 55% de rendimento em madeira serrada, citada por Rocha e Tomaselli (2002) como resultados médios para espécies de folhosas. Dentre as classes, a de maior diâmetro apresentou rendimento superior em relação às demais, diferenciando-se estatisticamente da classe de menor diâmetro, a qual apresentou menor rendimento.

A classe intermediária apresentou rendimento entre as classes inferior e superior, não diferenciando de ambas. Este comportamento já era esperado, pois normalmente, com o aumento em diâmetro, o aproveitamento da tora em madeira serrada aumenta, conforme relatado por Bonato Jr. et al. (2017). Apesar dos diâmetros considerados baixos, o rendimento mostrou-se satisfatório.

Vale ressaltar que o desdobro foi realizado buscando as larguras máximas possíveis em cada peça. Em função disso, o rendimento aumentou com o aumento do diâmetro da tora. Outro fator a destacar é em relação ao comprimento da tora, o qual favorece menor conicidade das mesmas, resultando no bom desempenho no aproveitamento da tora no desdobro, sem a necessidade de operações para alinhamento da tora, que acarreta em peças não aproveitáveis (CARVALHO et al., 2019c)

A classe de menor diâmetro apresentou menor quantidade de peças de madeira serrada (21 peças) e produtos com menores larguras, em média 96,7mm. A classe intermediária apresentou maior quantidade de peças (27) bem como largura média equivalente a 120,4mm. Já a classe diamétrica de maior diâmetro médio das toras proporcionou 42 peças com largura média de 167,3mm.

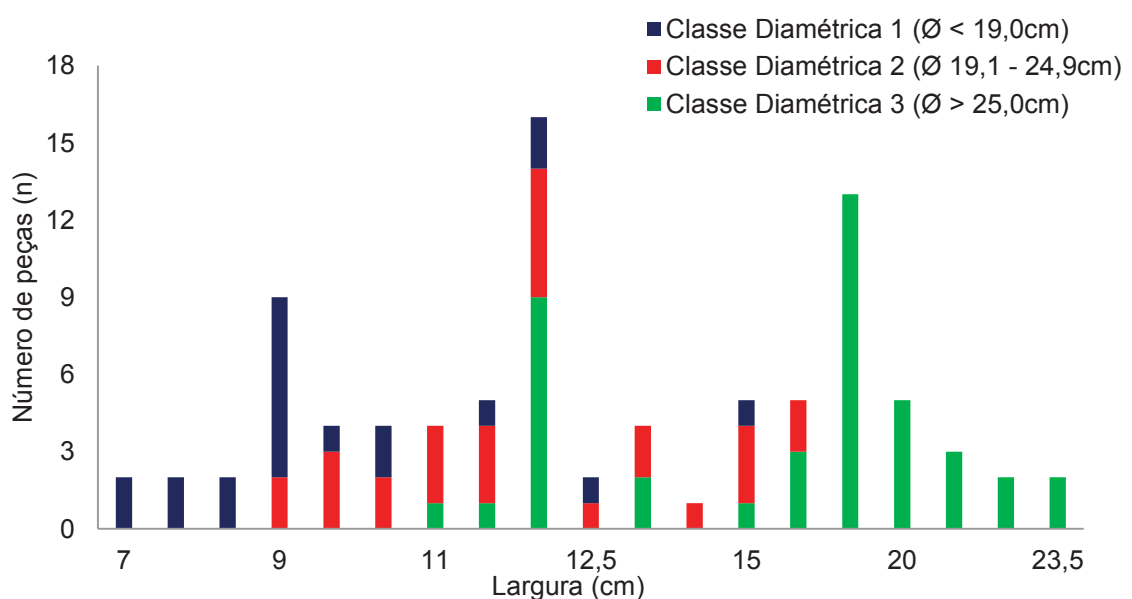
Com o incremento em diâmetro das toras foi possível obter, utilizando modelos de desdobro tangenciais, peças com desenhos característicos mais desejados para o mercado (FIGURA 8) e larguras maiores (FIGURA 9), permitindo aplicações variadas e com maior valor agregado.

FIGURA 8 – ASPECTO ESTÉTICO DE TÁBUA COM A FACE TANGENCIAL DA ESPÉCIE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 9 – QUANTIDADE DE PEÇAS E LARGURAS DAS PEÇAS POR CLASSE DIAMÉTRICA



FONTE: O autor (2020).

O modelo de desdobro aplicado foi eficaz, com rendimentos em escala crescente em função das classes diamétricas, indicando a capacidade de uso da espécie para obtenção de madeira serrada, sendo compatível e em alguns casos, com rendimentos superiores aos de espécies exóticas e nativas.

O aumento de rendimento com incremento em diâmetro das toras, foi contrário ao observado por Cunha et al. (2015b) e Müller et al. (2017), os quais avaliando o rendimento bruto do desdobro tangencial de espécies de eucaliptos, verificaram que o incremento em diâmetro não implica diretamente no aumento em rendimento, o que está associado a utilização de modelos de corte diferentes nas classes diamétricas.

Estudos com espécies plantadas, como relatado por Murara Jr. et al. (2013), com *Pinus taeda*, obtiveram rendimento máximo de 46,75% em desdobro aleatório de toras entre 18 e 44cm de diâmetros. Pedro et al. (2014), avaliando o rendimento no desdobro tangencial de *E. cloeziana* e *E. saligna* com 27 anos e diâmetro entre 30 a 39,5cm obtiveram resultado de 42,4%.

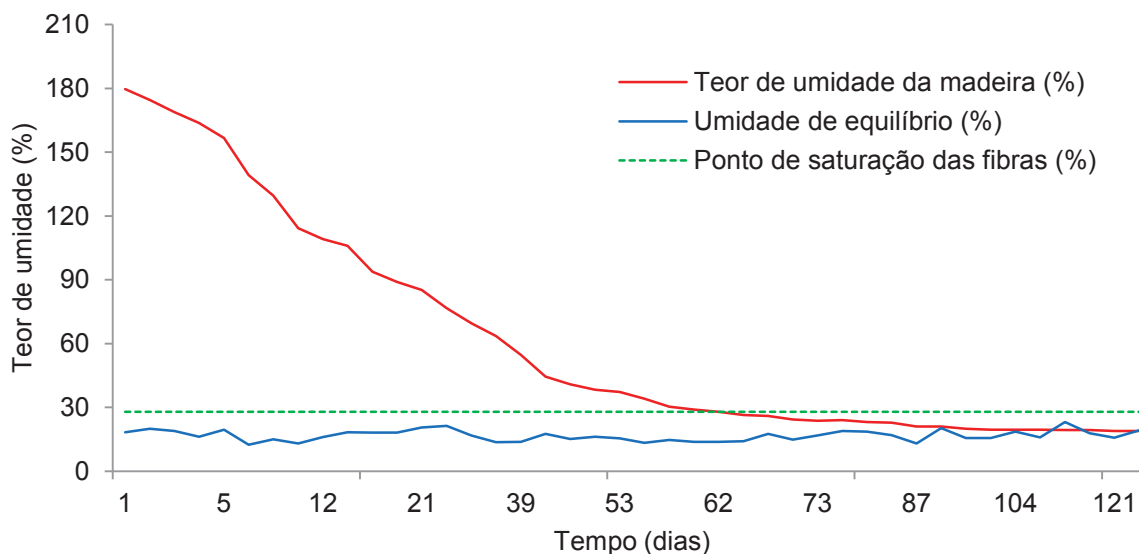
Cunha et al. (2015b) obtiveram rendimento bruto de 56,7% em classe de 20 a 25cm de diâmetro e 51,9% em classes diamétricas de 25,1 a 30cm estudo com *Eucalyptus*. Carvalho et al. (2019c) utilizando modelo de desdobro tangencial alternado, obteve rendimento médio de 47,08% em toras de *Eucalyptus* spp. com diâmetro médio de 33cm.

Em estudos com espécies nativas, Bonato Jr. et al. (2017) relatam em estudo de desdobro aleatório com toras de 20 a 32cm de diâmetro *Araucaria angustifolia*, valor de 47,61% de rendimento médio. Melo et al. (2016), em estudo com a madeira de *Qualea* sp, obtiveram rendimento máximo de 57% em toras de grande diâmetro (>75cm), porém em diâmetros menores (55 a 75cm) o rendimento reduziu para 49%.

### 3.2 SECAGEM AO AR LIVRE DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

O desempenho da madeira na secagem ao ar livre foi avaliado, com o teor de umidade inicial médio de 180% e valores mínimos e máximos de 158 e 200%, respectivamente (FIGURA 10).

FIGURA 10 – CURVA DE SECAGEM AO AR E UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* AOS 25 ANOS DE IDADE



FONTE: O autor (2020).

A aplicação da madeira para alguns fins é indicada com teor de umidade abaixo de 30% (LENZ et al., 2015). Para a madeira de *Gmelina arborea* foram necessários 60 dias para atingir este valor, com redução acentuada até chegar ao ponto de saturação das fibras (PSF  $\approx$  30%), onde há mudança do arqueamento da curva de secagem. Para atingir a condição de equilíbrio higroscópico com a umidade local, correspondente a 18,9%, foram necessários mais 63 dias, totalizando um período de 123 dias para secagem da madeira, de verde a seca (T.U. = 18,9%).

O teor de umidade da madeira atingiu o equilíbrio com a umidade do ambiente, logo o método de secagem foi eficaz, pois segundo Mendes e Arce (2003), a determinação da umidade de equilíbrio local fornece uma referência consistente para secagem com precisão. Em casos onde a madeira necessita teor de umidade abaixo deste ponto, como uso interno e mobiliário é indicado a utilização de um método de secagem artificial complementar.

O teor de umidade inicial elevado também foi percebido por Muñoz e Moya-Roque (2008) avaliando a secagem da mesma espécie, onde o valor médio inicial de umidade da madeira era de 170%. Elevados teores de umidade inicial é considerado normal para espécies de rápido crescimento, porém, também é dependente das condições de crescimento e propriedades anatômicas, pois segundo SIAU (1995)

tais propriedades apresentam relação direta com o fluxo de água durante a secagem da madeira.

A velocidade de perda de água é influenciada pelas estruturas anatômicas, pois apresentam uma ampla gama de arranjos que podem facilitar ou dificultar o processo de secagem (REDMAN et al., 2016). Ademais, propriedades físicas, químicas e anatômicas combinam-se, caracterizando o comportamento da taxa de secagem da madeira, pois afetam parâmetros como capilaridade, permeabilidade, gradiente de temperatura e concentração de água na madeira.

Em estudo de Braz et al. (2015), com *Tectona grandis* e *Acacia mangium*, teores de umidade inicial de 71 e 96,5%, respectivamente, foi necessário o período de 89 dias para que a madeira de teca entrasse em equilíbrio com a umidade do ambiente de 11,4%. Já a madeira de acácia, após 102 dias ainda estava com 21,4% de teor de umidade. Liebl et al. (2017) avaliando a secagem de *Eucalyptus* spp. com teores médios de umidade inicial em torno de 100%, obtiveram teores de umidade final variando de 19,97 a 41,70%, após 90 dias de secagem ao ar.

A partir de 90 dias de secagem, a madeira de *Gmelina arborea* já apresentava tendência à estabilização da umidade ( $\approx 20\%$ ) (FIGURA 10), com pequenas oscilações em função da variação das condições climáticas locais, o que levou a manutenção da secagem até estabilização dos pesos das amostras controle.

O fluxo de água livre no interior da madeira ocorre especialmente pelo lume dos vasos e fibras, acarretando em uma taxa de secagem elevada do estado saturado da madeira até o PSF, correspondente a 2,51% de umidade por dia. Abaixo do PSF a água higroscópica está ligada por pontes de hidrogênio às moléculas polares da celulose, o que faz com que qualquer retirada da umidade da parede celular ocorra de forma mais lenta.

Tal fato resultou em uma taxa de secagem média de 0,18% de umidade ao dia com 63 dias para atingir o equilíbrio higroscópico com o ambiente, praticamente equivalente ao tempo de secagem do estado verde ao PSF, que foi de 60 dias. Isto porque a taxa de secagem da água de difusão apresentou uma redução aproximada de 93% em relação taxa de secagem água livre (TABELA 3).

TABELA 3 – TAXA DE SECAGEM (% U DIA<sup>-1</sup>) DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Amostra	Verde – 30%	30% - 18,9%	Verde – 18,9%
A1	2,46	0,17	1,14
A2	2,46	0,22	1,35
A3	2,57	0,15	1,45
A4	2,48	0,17	1,22
A5	2,56	0,17	1,29
Média	2,51 (2,09)	0,18 (14,44)	1,29 (9,20)

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Entre parênteses coeficiente de variação.

As condições ambientais, incidência de ventos perpendiculares à pilha de madeira, baixa precipitação e temperaturas constantes, foram essenciais para o processo de secagem abaixo do PSF. Tal fato resultou na sobreposição das curvas de umidade de equilíbrio da madeira e do ambiente.

Liebl et al. (2017) obtiveram taxa de secagem total com variações de 0,62 a 1,14% U dia<sup>-1</sup> em madeira de *Eucalyptus* spp.. Stangerlin et al. (2009) encontraram taxa de secagem equivalente a 0,51 e 0,68% U dia<sup>-1</sup>, em secagem de *E. tereticornis* e *C. citriodora*, respectivamente. Os valores obtidos no presente trabalho são superiores aos citados, indicando o bom potencial de secagem da madeira de *Gmelina arborea*.

A alta taxa de secagem inicial reduziu o teor de umidade de forma acelerada, a qual ocorre através da evaporação e remoção de massa das cavidades celulares dos elementos vasculares. Este fato amortiza os custos em caso de transporte de madeira, assim como minimiza a possibilidade de ocorrência de organismos xilófagos na madeira, agregando qualidade e valor à madeira serrada. Com isso, a espécie configura-se como alternativa para uso e secagem ao ar livre, perante as atuais madeiras com características semelhantes disponíveis no mercado.

Apesar da elevada taxa de secagem natural, a madeira apresentou baixa incidência de defeitos por análise visual realizada no fim da secagem, como empenamentos e rachaduras, não apresentando incidência de xilófagos, como fungos emboloradores e manchadores.

Estes fatos são considerados positivos, uma vez que a madeira é considerada juvenil, onde o comportamento pode oscilar e a incidência de problemas na secagem pode ocorrer em maior grau, resultando em perdas consideradas de madeira. A espécie apresenta potencial de aplicações, em especial para usos que não toleram empenamentos e torções, como por exemplo, portas e móveis em geral.



## **4 CONCLUSÕES**

A espécie apresenta potencial para a produção de madeira serrada, pois exibe rendimentos satisfatórios, com aumento do rendimento associado ao incremento em diâmetro das toras.

A madeira apresentou altas taxas de secagem, especialmente da água capilar, baixa incidência de defeitos, acarretando em teor de umidade final da madeira em equilíbrio com o ambiente em um período condizente com espécies usuais.

## CAPÍTULO 3: PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

### 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material lignocelulósico, o qual apresenta variações e padrões diferentes que podem variar da célula à planta, onde análises macro e microscópicas anatômicas e quantificação dos compostos químicos são realizadas para caracterizar este material e indicar as possibilidades de aplicações. A definição do termo madeira pode ser considerada complexa, pois segundo Evert (2006) esta se refere a interações de processos ontogenéticos de meristemas primários e secundários, associada à formação celular, composição química e origem evolutiva da planta (SCHWEINGRUBER et al., 2012).

As características anatômicas, além de possibilitarem a identificação de diferentes espécies, permitem o entendimento do lenho e apresentam uma relação estreita com as propriedades da madeira. Dentre estas, salienta-se a influência na densidade, a permeabilidade e a resistência mecânica (EVANGELISTA et al., 2010).

Condicional à organização anatômica e química está à aplicação tecnológica da matéria-prima madeira, onde as propriedades são determinantes para a sua utilização. Tal organização e estrutura da madeira influenciam na densidade, que por sua vez está relacionada com a retração da madeira. Ou seja, o aumento da densidade acarreta em maior retração (KOLMANN e COTÊ, 1968; PANSHIN e DE ZEEUW, 1980; POUBEL et al., 2011).

Além da densidade, fatores como a taxa de secagem podem influenciar na retração (GLASS e ZELINKA, 2010). Benin et al. (2017) associam a retração com o ângulo das microfibrilas, espessura de parede e volume de lúmen das células. Dias et al. (2017) enfatizam que o conjunto de propriedades anatômicas e físico-químicas se relacionam com a estabilidade dimensional da madeira.

Em relação aos compostos químicos, podem ocorrer variações para a mesma espécie, em função das condições locais de plantio, como clima, tipo de solo e compostos nutritivos disponibilizados (DEMIRBAS, 2009; KUMAR et al., 2010).

A resistência da madeira expressa a capacidade do material em suportar cargas que podem alterar suas dimensões, logo quanto mais resistente aos esforços melhores as respostas da madeira em uso, com capacidade de absorver a energia atuante sobre a mesma. Em casos extremos a madeira não é capaz de absorver o

esforço aplicado, ultrapassando o limite proporcional, passando do estado elástico para plástico, ou seja, não retorna a sua forma original apresentando deformação permanente, comprometendo o seu uso.

Nesse sentido, infere-se que algumas propriedades são desejadas para alguns fins, porém indesejadas para outros. Entretanto, há alternativas para modificar algumas propriedades com base na alteração dos compostos da madeira. Os componentes químicos, por exemplo, são alterados com a aplicação de processos que utilizam calor, degradando os compostos, cada um em um nível de temperatura, modificando assim o comportamento tecnológico da madeira.

Portanto, conhecer as propriedades e composição da madeira é primordial para indicação e utilização mais eficiente. Deste modo, o objetivo do capítulo consiste em caracterizar a madeira de *Gmelina arborea* quanto às propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Após o abate das árvores, estas foram seccionadas (FIGURA 11) retirando três discos, com espessura de 40mm, de cada indivíduo (Base / DAP – diâmetro a altura do peito / Altura comercial).

FIGURA 11 - OBTENÇÃO DE TORAS DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A) retirada de disco para determinação das propriedades da madeira; B) toras seccionadas; C) disco retirado da base com demarcação dos anéis de crescimento.

Os discos da base de cada árvore foram utilizados para contagem dos anéis de crescimento e determinação da idade das árvores, as quais resultaram em idade média de 25 anos. O DAP médio foi de 24,5cm e altura média comercial 9,4m. Os três discos de cada árvore foram utilizados para determinação da densidade básica ao longo do fuste, propriedades químicas e anatômicas.

As toras da base, com 1,30m de comprimento, foram utilizadas para obtenção de blocos, de onde foram confeccionados amostras para determinação das propriedades físicas (retratibilidade e densidade aparente) e das propriedades mecânicas (flexão estática, dureza Janka e compressão paralela às fibras).

### 2.1 PROPRIEDADES ANATÔMICAS

A partir de cunhas retiradas dos discos (base, DAP e topo da altura comercial), confeccionou-se três blocos de madeira de um cm<sup>3</sup> (1cm x 1cm x 1cm),

orientados da casca até a região próxima à medula. Para a confecção das lâminas, o material foi aquecido em água para amolecimento e posteriormente foram realizados cortes orientados em micrótomo com seções de espessura aproximada de 25 micrômetros.

O material foi colorido com azul de Astra e safranina, seguido de desidratação seriada com álcool etílico. Em sequência, os cortes das três seções (transversal, tangencial e radial) foram colocados sobre uma lâmina de vidro com posterior adição de Entellan e lamínula sobre os mesmos. Após secagem, as lâminas histológicas foram utilizadas para as observações de suas estruturas.

A descrição dos elementos anatômicos e medições seguiram as recomendações da IAWA (1989) com adaptações segundo Coradin e Muñiz (1992), tendo como resultado das 25 repetições, a média e o desvio padrão das seguintes características quantitativas mensuradas: frequência de vasos ( $\text{mm}^2$ ), diâmetro de vasos ( $\mu\text{m}$ ), altura e largura de raios ( $\mu\text{m}$ ) e frequência de raios (mm linear).

Para análise do comprimento ( $\mu\text{m}$ ) e espessura da parede das fibras ( $\mu\text{m}$ ) foram utilizadas pequenas amostras dos blocos de madeira de um  $\text{cm}^3$  dos discos da base, orientados da casca até a região próxima à medula. O procedimento consistiu em submergir as amostras em peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial.

O material com a solução ficou em estufa aquecida em temperatura de  $60^\circ\text{C}$  por um período de 24 horas. Após este período, o material foi submetido à lavagem com água destilada e posteriormente os fragmentos foram submersos em corante safranina. Após 20 minutos o material foi lavado novamente para retirar o excesso de corante e procedeu-se a montagem das lâminas com água para realização das leituras dos parâmetros anatômicos.

Para medições relacionadas à anatomia da madeira utilizou-se o estéreo microscópio Zeiss Discovery V12, onde as imagens foram obtidas e processadas em software AxionVision 4.7. Para medições de comprimento e largura de fibras foi utilizado microscópio óptico Olympus CX-40 com auxílio de ocular dotada de escala micrométrica.

## 2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

### 2.2.1 Densidade básica e aparente

Para a determinação da densidade básica da madeira de *Gmelina arborea* foram utilizadas duas cunhas opostas retiradas de um disco de cada posição por árvore (base, DAP e topo da altura comercial), totalizando 36 cunhas. As cunhas foram identificadas e completamente submergidas em água. Após a saturação procedeu-se a pesagem das cunhas em balança hidrostática.

Posteriormente, o material foi levado à estufa de secagem com temperatura constante, inicialmente a  $50\pm 2^{\circ}\text{C}$  e em seguida a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  para obtenção da massa seca. Com estes dados foi calculada a densidade básica da madeira ( $D_b$ ), seguindo a Norma ABCP M14/70.

Para a determinação da densidade aparente a 12% ( $D_a$ ) foi utilizada como base a norma COPANT – 461 (1972). Foram confeccionados 10 amostras por árvore, orientados com dimensões nominais de 25 x 25 x 100mm, totalizando 60 amostras. As amostras foram acondicionadas em câmara climática a temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $65\pm 5\%$ , até massa constante e em seguida foram determinados seus pesos e volumes. Após a obtenção dos dados foi calculada a densidade aparente a 12% de umidade.

### 2.2.2 Variação dimensional da madeira

A primeira tora de cada árvore foi utilizada para retirar um bloco de madeira do qual foram confeccionados 10 amostras por árvore com dimensões de 25 x 25 x 100mm, devidamente orientados conforme determinação da norma COPANT – 462 (1972). Após identificação dos materiais, procederam-se as medições das amostras no estado saturado, 12% de umidade e 0% de umidade.

Em seguida foram calculadas as retrações axial, radial, tangencial, volumétrica e o fator anisotrópico da madeira. Para os ensaios de retração dimensional utilizou-se uma balança digital com precisão de 0,01g, um paquímetro e um micrômetro digital com precisão de 0,01mm, uma estufa com controle de temperatura e ventilação forçada e um dessecador.

## 2.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS

Do disco retirado do DAP de cada árvore foram obtidas amostras de 1cm de largura e comprimento da medula à casca e obtidos pequenos cavacos de madeira com o auxílio de um facão. Utilizando-se um moinho de facas do tipo Willey, os cavacos foram transformados em serragem e posteriormente peneirados para separação em diferentes granulometrias conforme a norma TAPPI T 257 cm - 02, sendo utilizados para as seguintes análises: Teor de extrativos totais T 204 cm - 97; Teor de lignina T 222 om - 02; Teor de cinzas na madeira T 211 om - 02.

O teor de carbono fixo foi calculado conforme EQUAÇÃO 12.

$$\text{Teor de carbono fixo (\%)} = (100 - (\text{Teor de cinzas (\%)} + \text{Voláteis (\%)})) \quad (12)$$

A determinação do teor de holocelulose (Hol) foi realizada através da diferença entre o teor de extrativos totais (ET), o teor de lignina Klason (L) e o teor de cinzas (TC) em relação ao total, considerado 100%.

## 2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para realização dos ensaios mecânicos, amostras foram obtidas dos blocos e pranchas retirados da primeira tora de 1,30m de comprimento. Primeiramente, o material teve suas dimensões reduzidas e foram levadas à câmara climatizada para equilíbrio higroscópico ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura e  $65 \pm 5\%$  de umidade relativa do ar).

Após as peças estarem com peso constante, procedeu-se com a confecção de cinco amostras por árvore para cada ensaio de determinação das propriedades mecânicas, seguindo as recomendações da norma COPANT (*Comisión Panamericana de Normas Técnicas*): COPANT 464/1972 (Compressão paralela às fibras); COPANT 465/1972 (Determinação da Dureza Janka); e COPANT 555/1972 (Flexão estática).

Os ensaios foram realizados em Máquina Universal de Ensaios (EMIC – DL 30.000) e os resultados médios expressos no Sistema Internacional de Unidades (SI).

## 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Previamente à análise estatística os dados foram verificados quanto à homogeneidade da variância (Bartlett e Hartley's) e normalidade (Kolmogorov – Smirnov). Posteriormente realizou-se análise de variância (ANOVA –  $p \leq 0,05$ ) e verificada diferença significativa procedeu-se com o teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação de médias. A correlação de Pearson foi utilizada entre a densidade e os parâmetros anatômicos.



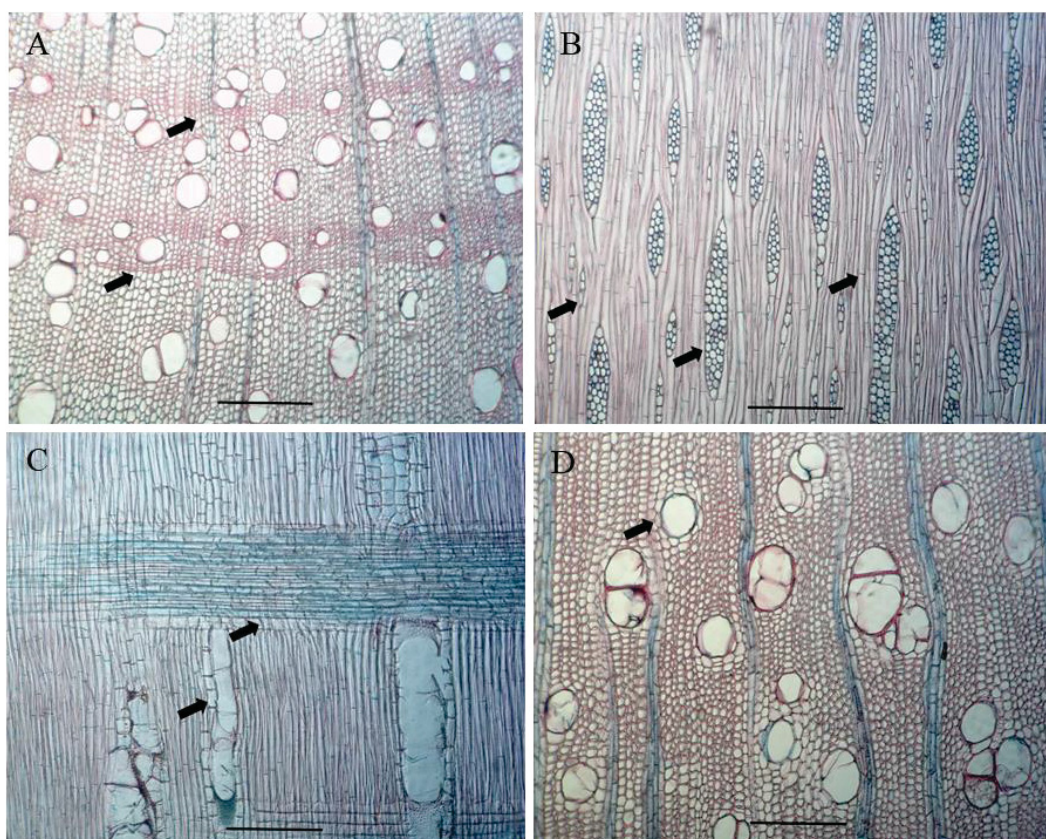
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA

##### 3.1.1 Descrição anatômica da madeira de *Gmelina arborea*

A madeira de *Gmelina arborea* apresenta anéis de crescimento distintos, diferença de coloração entre cerne e alburo com grã irregular entrecruzada. A porosidade é difusa com vasos solitários e múltiplos (FIGURA 12-A).

FIGURA 12 - IMAGENS ANATÔMICAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A - corte transversal, indicando os anéis de crescimento; B - corte tangencial com raios unisseriados e multisseriados; C - corte radial com indicação dos tipos de células de raio e parênquima axial associado ao vaso; D - corte transversal com destaque ao parênquima vasicêntrico. Escala correspondente a 250  $\mu\text{m}$ .

O diâmetro tangencial médio do lúmen dos vasos está entre 100 e 200 $\mu\text{m}$ , sendo observada pouca presença de tiloses em formação. Fibras com comprimento médio entre 900 e 1600 $\mu\text{m}$ , com 4,09 $\mu\text{m}$  de espessura da parede e com presença

de septos (FIGURA 12-B). Raios heterogêneos, formados por células procumbentes na parte central e quadradas nas extremidades (FIGURA 12-C). Parênquima axial paratraqueal escasso a vasicêntrico abundante (FIGURA 12-D), com predominância de raios multisseriados de três a cinco células de largura (FIGURA 12-B).

### 3.1.2 Análise da estrutura anatômica da madeira

O diâmetro e frequência de vasos foram medidos a partir das imagens das diferentes posições axiais da espécie (TABELA 4). Os valores mínimos, máximos, a média e os desvio padrão para cada posição encontram-se no apêndice.

TABELA 4 – VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DE VASOS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* EM TRÊS POSIÇÕES DO FUSTE

Posição	Diâmetro do vaso ( $\mu\text{m}$ )		Frequência de Vasos ( $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$ )	
	Valor Médio	C.V. (%)	Valor Médio	C.V. (%)
Base	133,71 b	40,10	7,76 a	48,16
DAP	156,68 a	33,93	7,08 a	27,35
Topo	162,32 a	24,89	5,85 b	34,36
Média geral	150,90	33,64	6,90	40,52

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Letras diferentes na mesma coluna significam diferença estatística pelo teste de Tukey (95% de probabilidade). C.V.: Coeficiente de variação.

Os menores diâmetros dos vasos foram encontrados na base, diferindo significativamente das demais posições. A menor frequência de vasos foi encontrada no topo da altura comercial, a qual também se diferenciou das demais posições.

A associação dos diâmetros e frequência de vasos tem relação direta não só com a fisiologia da planta, mas também com as propriedades físicas e mecânicas. A alta frequência de vasos com diâmetros elevados proporcionam alta permeabilidade e baixa resistência mecânica (CHIMELO, 2007), isto devido à quantidade de material lenhoso em relação aos espaços porosos.

O diâmetro tangencial do lúmen dos vasos apresenta diâmetro médio entre 100 e 200  $\mu\text{m}$ , conforme classificação do IAWA, (1989), enquadrando-se como espécie de vasos de textura média (IPT, 2012). Moya-Roque e Tomazello (2008), avaliando indivíduos entre 9 e 12 anos, encontraram diâmetro médio de vaso maiores (189 $\mu\text{m}$ ), porém com frequência menor, variando entre 3 e 6 raios/ $\text{mm}^2$ . As variações anatômicas observadas são atribuídas à idade e condições que

influenciam o crescimento da espécie, como por exemplo, os fatores climáticos de precipitação e aspectos nutritivos do solo do local em que a espécie está inserida.

A altura média dos raios maior ao observado por Moya-Roque e Tomazello (2008), os quais citam valores de 270 $\mu$ m para altura do raio, largura de 115 $\mu$ m e frequência de 5,6 raios/mm. A largura dos raios reduz com aumento da posição na árvore e a frequência manteve-se estável (TABELA 5).

TABELA 5 – VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DOS RAIOS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* EM TRÊS POSIÇÕES DO FUSTE

Posição	Altura dos Raios ( $\mu$ m)		Largura dos Raios ( $\mu$ m)		Frequência de Raios (n°/mm)	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)
Base	351,89 a	37,76	70,88 a	21,13	4 a	29,24
DAP	294,55 b	34,34	65,77 a	28,48	4 a	34,12
Topo	319,62 ab	33,73	57,29 b	20,18	4 a	25,93
Média geral	322,01	36,22	64,65	25,21	4	29,93

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Letras diferentes na mesma coluna significam diferença estatística pelo teste de Tukey (95% de probabilidade). C.V.: Coeficiente de variação.

A altura dos raios apresenta comportamento análogo ao observado na densidade básica (TABELA 6), aumentando da base para o DAP e reduzindo do DAP para o topo, com correlação positiva entre estas variáveis ( $r = 0,8273$ ).

TABELA 6 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (R) ENTRE A DENSIDADE BÁSICA (Db) COM OS PARÂMETROS ANATÔMICOS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

	Db	Diâmetro do vaso ( $\mu$ m)	Frequência de Vasos (n°/mm <sup>2</sup> )	Altura do Raio ( $\mu$ m)	Largura do Raio ( $\mu$ m)	Frequência de Raios (n°/mm)
Db	1					
Diâmetro do vaso ( $\mu$ m)	-0,3296	1				
Frequência de Vasos (n°/mm <sup>2</sup> )	-0,1639	-0,8773	1			
Altura do Raio ( $\mu$ m)	0,8273	-0,8031	0,4186	1		
Largura do Raio ( $\mu$ m)	-0,1424	-0,8876	0,9998	0,4383	1	
Frequência de Raios (n°/mm)	-0,8663	-0,1860	0,6347	-0,4361	0,6178	1

FONTE: O autor (2020).

Os demais parâmetros anatômicos apresentaram correlação negativa, com destaque para a frequência de raios ( $r = -0,8663$ ), ou seja, quanto maior a frequência

de raios menor a densidade básica. Esta análise é pertinente também para os parâmetros diâmetro do vaso, frequência de vaso e largura do raio.

Com base no comprimento de fibra da espécie, a qual aumenta nas posições radiais, associada à redução do diâmetro e o aumento da espessura da parede do lúmen radialmente, conclui-se que a madeira em estudo é juvenil, ou seja, ainda não estabilizou seu crescimento (TABELA 7).

TABELA 7 – VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DE FIBRAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* EM TRÊS POSIÇÕES RADIAIS

Posição	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )		Diâmetro do lúmen ( $\mu\text{m}$ )		Espessura da parede ( $\mu\text{m}$ )	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)
Medula	811,11 a	19,46	31,40 a	19,79	3,74 a	30,71
Intermediária	1098,33 b	13,11	30,13 ab	21,39	3,93 a	29,60
Casca	1417,22 c	17,19	29,08 b	22,73	4,61 b	29,48
Média geral	1108,89	27,98	30,20	21,43	4,09	31,26

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Letras diferentes na mesma coluna significam diferença estatística pelo teste de Tukey (95% de probabilidade). C.V.: Coeficiente de variação.

Tal fato está associado às condições edafoclimáticas e aos tratamentos silviculturais, os quais afetam a taxa de crescimento. Como consequência dos fatos supracitados, maior será a quantidade de madeira adulta e de melhor qualidade, como observado por Kojima et al. (2009) em estudos com *Gmelina arborea*.

A observação de madeira juvenil é comum, sendo que a constituição de madeira adulta inicia-se mais cedo em algumas espécies, em contrapartida, em outras, a madeira juvenil predomina por vários anos (LARA PALMA et al., 2010), como é o caso da *Gmelina arborea*, a qual sofreu com poucas intervenções silviculturais.

O diâmetro do lúmen está diretamente relacionado com a espessura da parede das fibras, sendo inversamente proporcionais. Ou seja, quando o diâmetro do lúmen diminui e a espessura da parede aumenta, indicando menos espaços vazios, resultam em aumento da densidade e resistência mecânica da madeira.

Apesar do diâmetro do lúmen e a espessura da parede celular das fibras serem consideradas as características mais influentes na densidade da madeira, demais fatores, como a frequência e espessura da parede celular de parênquima e frequência e tamanho de vasos também atuam como agentes influentes não só para

a densidade, mas também para outras propriedades da madeira, por exemplo, a permeabilidade e resistência mecânica.

Os valores para as fibras coincidem com os obtidos por Moya-Roque e Tomazello (2008), os quais citam fibras com paredes finas ( $4,56\mu\text{m}$ ), diâmetro do lúmen de  $35,25\mu\text{m}$  e comprimento de  $1020\mu\text{m}$ . A espessura média da parede celular da fibra ( $4,09\mu\text{m}$ ) é semelhante a espécies de eucalipto de média densidade básica, como *E. obliqua* ( $3,6\mu\text{m}$ ), *E. pilularis* ( $4,1\mu\text{m}$ ) e *E. marginata* ( $3,9\mu\text{m}$ ), porém diferencia-se de espécies de alta densidade básica, como *C. citriodora*, a qual apresenta espessura média da parede de  $6,1\mu\text{m}$  (REDMAN et al., 2016).

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

### 3.2.1 Densidade da madeira

Após realização de ANOVA não foi verificada diferença estatística significativa entre as posições axiais do fuste para a densidade básica (Db), a qual apresentou o valor médio de  $0,38\text{ g.cm}^{-3}$  (TABELA 8).

TABELA 8 – DENSIDADE BÁSICA EM TRÊS POSIÇÕES DO FUSTE E DENSIDADE APARENTE (12%) DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Densidade	Média ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Básica (Db) - Base	0,38	0,0254	6,63
Básica (Db) - DAP	0,37	0,0157	4,29
Básica (Db) - Topo	0,38	0,0433	11,28
Básica (Db) - Média	0,38	0,0329	8,16
Aparente (Da) – Média	0,45	0,0327	7,29

FONTE: O autor (2020).

A variação ao longo do fuste é considerada mínima tratando-se de uma madeira homogênea axialmente, o que é uma característica importante para uso industrial. Essa pequena variabilidade da densidade da base ao topo também foi observada por Espinoza (2004), o qual encontrou resultados de  $0,44\text{ g.cm}^{-3}$  na base,  $0,43\text{ g.cm}^{-3}$  no DAP e  $0,44\text{ g.cm}^{-3}$  no topo da altura comercial. Entretanto, a Db encontrada, considerada baixa, limita as aplicações desta espécie em situações em que há necessidade de maior resistência.

A madeira de *Gmelina arborea* classifica-se como madeira de baixa densidade (IAWA, 1989), apresentando média de  $0,38\text{ g.cm}^{-3}$ . A densidade aparente

a 12% de umidade apresentou valor médio de  $0,45 \text{ g.cm}^{-3}$  (TABELA 8) e está em conformidade com outras pesquisas com a madeira jovem de *Gmelina arborea* plantada comercialmente (DVORAK, 2004; PIOTTO et al., 2004; VALLEJOS et al., 2015 MOYA-ROQUE et al., 2017).

Os valores de densidade da madeira de *Gmelina arborea* aos 25 anos observado por Cerrada et al. (2011) foi de  $0,40 \text{ g.cm}^{-3}$  e densidade aparente de  $0,44 \text{ g.cm}^{-3}$ , resultados muito próximos aos obtidos neste trabalho com material de mesma idade. Em plantio experimental no litoral paranaense em sistema de talhadia, Marcene et al. (2006) relataram valor médio de  $0,58 \text{ g.cm}^{-3}$  com materiais de idades variadas entre 4 a 12 anos para *Gmelina arborea*.

Ademais, os coeficientes de variação médios de 8,16% para densidade básica e de 7,29% para densidade aparente foram menores que 10%, como indicado pelo *Forest Products Laboratory* (2010), demonstrando baixa dispersão dos valores relativos em relação à média.

Com base nesta propriedade, é indicado o uso da madeira para móveis e construções leves (ONYEKWELU e STIMM, 2002). Dvorak (2004) sugere os usos da madeira em celulose e papel, chapas de fibras de média densidade, chapas laminadas, compósitos madeira e cimento, aglomerados, móveis, interiores de móveis, compensados, portas, molduras, lápis e palitos de fósforo.

Analisando os valores do presente estudo e o referencial da literatura, verifica-se que há uma pequena variação de valores desta propriedade, o que está associada às características genéticas, práticas silviculturais, procedência e qualidade de sítio, fatores que podem influenciar nas propriedades físicas da madeira.

### 3.2.2 Variação dimensional da madeira

Os parâmetros da variação dimensional da madeira estão descritos na TABELA 9. A retração volumétrica, correspondente a 10,90%, juntamente com a o fator anisotrópico baixo, equivalente a 1,38, indicam que a madeira é estável dimensionalmente. Isto é comprovado pela baixa ocorrência de defeitos decorrentes da secagem da madeira, o que foi observado através de análise visual após a secagem ao ar livre.

TABELA 9 – VALORES MÉDIOS DE RETRAÇÃO TOTAL AXIAL, RADIAL, TANGENCIAL VOLUMÉTRICA E FATOR ANISOTRÓPICO DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Parâmetro	Retração total da madeira (%)	
	Média	Coefficiente de variação (%)
Axial	0,07	77,86
Radial	4,55	10,58
Tangencial	6,27	10,43
Volumétrica	10,90	9,77
Fator anisotrópico	1,38	8,20

FONTE: O autor (2020).

O valor do fator anisotrópico mais próximo da unidade (1) representa maior estabilidade, pois maior é a propensão em anular a natureza anisotrópica da madeira, favorecendo o uso da espécie na fabricação de produtos em que a instabilidade dimensional deve ser mínima. Isto se deve a proximidade dos valores de retração tangencial e radial, os quais são considerados baixos.

A retração axial da madeira de *Gmelina arborea* pode ser considerado normal, de acordo com a afirmação de Kollmann e Côtê (1968), os quais salientam que a retração longitudinal total de madeira normal varia entre 0,1% e 0,9%.

As diferentes alterações dimensionais entre os planos da madeira são atribuídos às características das estruturas anatômicas e químicas da madeira, pois conforme relatado por Kollmann e Côtê (1968) e Oliveira et al. (2010), espécies de folhosas apresentam altura e largura de raio variados e quanto maior o número destas células maior a probabilidade de restrição da alteração dimensional no sentido radial.

Complementando, Masserann e Mariaux (1985) salientam que as dimensões radiais das fibras, bem como a diferença química entre parede celular radial e tangencial também apresentam interferência na variação entre os planos anatômicos da madeira.

Avaliando a espécie de plantios na Venezuela com 25 anos, Cerrada et al. (2011) obtiveram valores médios de retração tangencial de 4,68%, retração radial de 2,92%, retração longitudinal de 0,23%, contração média volumétrica de 7,84% e fator anisotrópico médio de 1,66.

O coeficiente de variação das retrações tangencial, radial, volumétrica e fator anisotrópico estão na faixa de 10%, como indicado pelo *Forest Products Laboratory* (2010), sugerindo pouca variação destas propriedades da madeira, possibilitando aplicações onde se requeira melhor estabilidade dimensional da madeira, como

fabricação de mobiliários e limitando os usos onde pequenas variações dimensionais possam afetar a qualidade do produto.

A TABELA 10 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson (R) entre a densidade e as retrações axial, radial, tangencial, volumétrica e fator anisotrópico.

TABELA 10 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (R) ENTRE A DENSIDADE BÁSICA E APARENTE COM OS PARÂMETROS DE RETRAÇÕES DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

	Db	Da	R tangencial	R radial	R axial	R vol	FA
Db	1						
Da	0,9763	1					
R tangencial	-0,2801	-0,1690	1				
R radial	-0,2494	-0,1985	0,7570	1			
R axial	0,0966	0,0782	-0,0286	-0,0816	1		
R vol	-0,2798	-0,1894	0,9554	0,9130	-0,0009	1	
FA	-0,0448	0,0326	0,2520	-0,4304	0,0526	-0,0368	1

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Db: Densidade básica; Da: Densidade aparente (12%); R: Retração; vol: volumétrica; FA: Fator anisotrópico.

A relação entre a densidade com as demais propriedades físicas avaliadas foi baixa, além de não seguir uma tendência positiva ou negativa de correlação, não sendo possível associar a retratibilidade da madeira de *Gmelina arborea* com a densidade básica e aparente. Tais resultados corroboram com os obtidos por Dias et al. (2017), e sinaliza que a análise das relações entre as propriedades é necessária para avaliar a qualidade da madeira, ou seja, a determinação de uma característica isolada pode levar a interpretações e aplicações equivocadas da madeira.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Os valores obtidos da análise química imediata e os teores dos componentes químicos da madeira de *Gmelina arborea* estão na TABELA 11.

TABELA 11 - TEORES (%) DE CINZAS, VOLÁTEIS, CARBONO FIXO, EXTRATIVOS TOTAIS, LIGNINA E HOLOCELULOSE DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

	Cinzas	Voláteis	Carbono Fixo	Extrativos Totais	Lignina	Holocelulose
Média (%)	1,43	92,10	6,47	6,20	28,94	63,42
C.V. (%)	8,43	2,05	29,98	9,64	6,71	3,22
D.P.	0,12	1,89	1,94	0,60	1,94	2,04

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: C.V.: Coeficiente de variação; D. P.: Desvio padrão.



Os teores de cinzas e de lignina apresentaram-se superiores aos obtidos por Moya-Roque e Tenório (2013) e Moya-Roque et al. (2018). Já o teor de extrativos totais foi inferior ao encontrado pelos autores, entretanto, é considerado baixo. O teor de extrativos está associado à cernificação da madeira, podendo influenciar na resistência à fluidez de líquidos e formação de tilos, porém foram observadas poucas formações desta estrutura através da análise anatômica. Em consequência disto, quanto menor o teor de extrativos, mais permeável é a madeira, o que facilita o processo de secagem da mesma, como pode ser observado anteriormente.

O valor do teor de cinzas é superior e o teor de carbono fixo é inferior às madeiras usuais para geração de energia no Brasil, como, por exemplo, alguns materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. (ZANUNCIO et al., 2019; BRUN et al., 2018).

O teor de holocelulose e lignina foram semelhantes aos obtidos por Zanuncio et al. (2014) e Juízo et al. (2018) em madeira de eucalipto, costumeiramente utilizada em processos de polpação. Ademais, o teor de lignina foi semelhante a 27,06%, obtido por Castro et al. (1979) avaliando *Gmelina arborea* para produção de celulose.

Deduz-se que a espécie apresenta baixa capacidade combustível, comprometendo o potencial energético quando exigido, sendo o teor de cinzas e o teor de carbono fixo os responsáveis em maior proporção. Porém, sugere-se que esta espécie pode ser utilizada na fabricação de pellets e briquetes, minimizando o efeito negativo da baixa densidade da madeira. Pode-se inferir que a espécie estudada apresenta potencialidade para uso no setor de celulose e papel, pois teores baixos de extrativos e lignina afetam positivamente a produção e rendimento de polpa celulósica.

Modificações e degradação dos componentes químicos da madeira são observadas quando se aplica calor sobre a mesma, como migração dos extrativos para a superfície e redução do teor de hemiceluloses (CADEMARTORI et al., 2014b). Deste modo, alterações permanentes na estrutura química da madeira podem ocorrer, onde cada componente é degradado a uma temperatura diferente, conforme a resistência térmica individual de cada composto, modificando a madeira, pelo rearranjo dos constituintes da madeira, sendo passível de novas aplicações tecnológicas.

### 3.4 CARATERIZAÇÃO MECÂNICA

Na TABELA 12 estão descritos os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da caracterização mecânica da madeira de *Gmelina arborea*.

TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* OBTIDAS A 12% DE UMIDADE

Propriedade Mecânica da Madeira		Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
Compressão paralela às fibras	$F_{c0}$ (MPa)	27,32	3,39	12,40
	$E_{c0}$ (MPa)	6428,83	1666,98	25,93
Flexão estática	$F_M$ (MPa)	62,67	3,00	4,79
	$E_{M0}$ (MPa)	7832,69	448,51	5,73
Dureza Janka Axial	$F_{H0}$ (N)	2582,61	475,28	17,43
Dureza Janka Radial	$F_{HR}$ (N)	2048,48	447,80	21,86
Dureza Janka Tangencial	$F_{HT}$ (N)	2236,69	450,05	21,25

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA:  $F_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $E_{c0}$ = módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão paralela às fibras;  $F_M$ = resistência à flexão estática;  $E_{M0}$ = módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão estática;  $F_{H0}$ = dureza da madeira na direção paralela às fibras obtida pelo método Janka;  $F_{HR}$ = dureza da madeira na direção radial obtida pelo método Janka;  $F_{HT}$ = dureza da madeira na direção tangencial obtida pelo método Janka. C.V. (%): coeficiente de variação.

A madeira de *Gmelina arborea* enquadra-se na classe C20, ou seja, a classe mais inferior, conforme a Norma Brasileira NBR 7190 - Projetos de estruturas de madeira (ABNT, 1997), sendo semelhante ao observado para a espécie Paricá com 28 anos (TEREZO et al., 2015), também considerada de baixa densidade. Nessa situação indica-se o uso da madeira em construção civil leve, rodapés, forros, lambris e usos temporários, como pontaletes e andaimes.

A resistência à compressão paralela às fibras, a flexão estática, o módulo de elasticidade em flexão estática e a dureza Janka nas orientações axial, radial e tangencial então dentro da faixa de valores observada por Moya-Roque (2001) e Trejos e Montero (2004).

Para a dureza Janka, o sentido axial apresentou valor superior às demais orientações da madeira, isto devido à disposição das células estruturais da madeira, majoritariamente distribuídas longitudinalmente. Entretanto, os valores de todas as orientações, axial, radial e tangencial, estão de acordo com os relatados por Trejos e Montero (2004), na faixa de 1980 a 3206N. Variações são atribuídas às diferentes idades e procedências da espécie, como também podem estar associadas à grã irregular entrecruzada da espécie.

Das propriedades mecânicas avaliadas, somente o módulo de elasticidade da compressão paralela às fibras ( $E_{c0}$ ) foi superior ao obtido por Müller et al. (2014) em madeira de *Eucalyptus benthamii*, espécie plantada na região Sul do Brasil. Em comparação com as espécies amazônicas avaliadas por Cardoso et al. (2012), os valores das propriedades mecânicas de *Gmelina arborea* são ligeiramente inferiores. Entretanto as espécies citadas apresentam densidade aparente superiores.

Do mesmo modo, os valores das características mecânicas são inferiores quando comparadas com as propriedades de pinus tropicais avaliadas por Trianoski et al. (2014), as quais apresentaram densidade aparente (12%) entre 0,43 e 0,57g.cm<sup>-3</sup>. Ressalta-se que a espécie *Gmelina arborea* apresenta densidade inferior a todas as espécies das literaturas citadas, associada ao lenho juvenil da espécie, o que resulta em valores inferiores nas propriedades mecânicas da madeira quando comparada à bibliografia citada.

A resistência mecânica limitada da madeira de *Gmelina arborea* compromete seu uso como, por exemplo, para fabricação de pisos, pois segundo Padilha (2005), espécies para este uso devem apresentar dureza Janka acima de 4.000N. No mesmo contexto a Associação Nacional de Pisos de Madeira – ANPM (2015) apresenta uma classificação de dureza de espécies tropicais usadas na fabricação de pisos, como o Tauari (*Couratari* spp.), com valor de 3.726N, enquadrando-se como dureza média.

Portanto, a madeira em condição natural desta espécie não é indicada para a finalidade citada anteriormente. Entretanto, como exposto por Morsing e Hoffmeyer (1998), o aumento das propriedades mecânicas pode ser obtido através do aumento da densidade aplicando-se tratamentos com calor e pressão sobre a madeira, com isso, amplia-se a possibilidade de uso da espécie estudada.

## 4 CONCLUSÕES

A madeira de *Gmelina arborea* apresenta baixa densidade básica, homogênea longitudinalmente e estável dimensionalmente.

A composição química denota baixo potencial energético da espécie em condição natural, porém com potencial para produção de pellets e briquetes.

A madeira apresenta baixa resistência e dureza, não devendo ser utilizada, quando na sua forma *in natura*, para usos em que as características mecânicas são exigidas, como usos estruturais em construção pesada e em pisos.

## **CAPÍTULO 4: EFEITO DA DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Gmelina arborea***

### **1 INTRODUÇÃO**

A utilização da madeira é delimitada pelo comportamento em uso da mesma, estando atreladas às suas propriedades físicas e mecânicas. Seu desempenho diante as situações adversas, como em contato com umidade ou em condições de esforços aplicados sobre a madeira, acabam por limitar o uso de algumas espécies.

Para minimizar os efeitos contrários, técnicas podem ser utilizadas para melhorar determinadas propriedades, como resistência, dureza e estabilidade dimensional. Partindo deste pressuposto, processos tecnológicos podem ser utilizados para transformar a madeira, garantindo-lhe a funcionalidade desejada, tais como tratamento térmico (CARVALHO et al., 2019a), polimerização in situ (LI et al., 2013), vapor higromecânico (GUO et al., 2015), entre outros.

Tais processos envolvem o emprego de variáveis que modificam a madeira, através de ações únicas, como a temperatura, ou combinadas como o processo termomecânico. Esse processo contempla duas grandezas agindo, temperatura e compressão mecânica, resultando da densificação do material. A primeira tem como objetivo reduzir a adsorção de água e melhorar a estabilidade dimensional da madeira por alteração dos compostos químicos. Já a compressão mecânica tem como intuito reduzir os espaços vazios, aumentando a força e rigidez da madeira.

A aplicação de temperaturas elevadas ocasiona modificações na estrutura química da madeira, como destruição das hemiceluloses e aumento proporcional da cristalinidade da celulose, conseqüentemente menores índices de grupos hidroxílicos permanecem presentes na madeira, podendo resultar em redução do inchamento da madeira (MOHEBBY et al., 2009). Porém, o efeito de recuperação da espessura natural do material após contato com a umidade é um dos principais desafios dos processos de densificação.

Segundo Priadi e Hiziroglu (2013) pode-se melhorar a estabilidade dimensional da madeira com aplicação de temperatura, porém os autores relatam a duração necessária deste processo térmico de 15 a 24 horas com temperaturas entre 130 a 300°C. Entretanto, um aumento excessivo da temperatura na densificação pode reduzir as propriedades de resistência devido à elevada

degradação química (ULKER et al., 2012), além de influenciar na dureza da madeira (PELIT et al., 2014).

Estudos como de Gong et al. (2010) avaliaram o efeito das interações de densificação e tratamento térmico sobre as propriedades dimensionais e mecânicas da madeira. Nairn (2006) em seu trabalho mostrou que o comportamento da madeira sob compressão depende de suas características anatômicas.

As interações das variáveis usadas no processo levam a questionamentos acerca do comportamento tecnológico da madeira e das condições ótimas do processo fortalecendo a necessidade de alternativas viáveis para incrementar as propriedades, principalmente de madeiras advindas de espécies florestais de rápido crescimento e baixo interesse comercial.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da densificação nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Gmelina arborea* com diferentes combinações de temperatura e compactação do material.

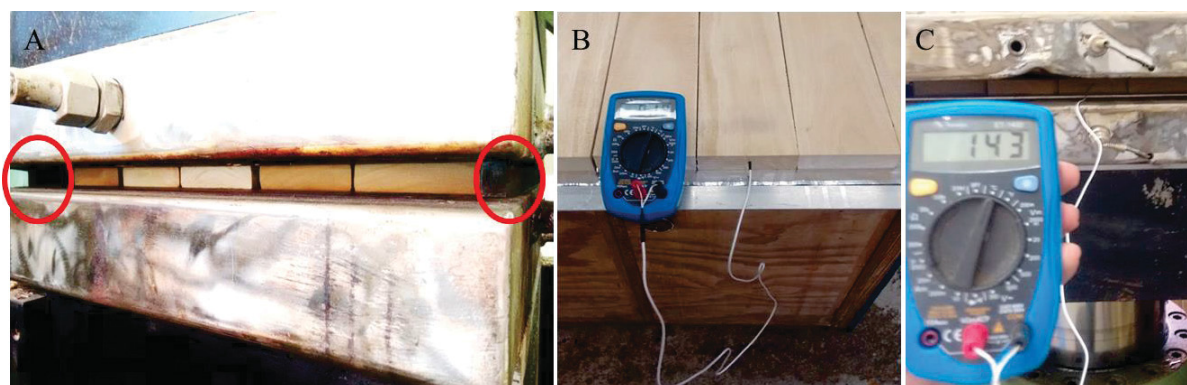
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA

Previamente ao tratamento de densificação as amostras de dimensões 25 x 100 x 2500mm (espessura x largura x comprimento) foram acondicionadas em câmara climática a temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $65\pm 5\%$ , até a estabilização de sua massa. Em sequência, foi realizada uma classificação das amostras em função de sua densidade, selecionando peças da mesma classe para o processo, evitando diferenças significativas desta propriedade entre os tratamentos.

Para o processo de densificação da madeira foram utilizadas dez peças por tratamento submetidas à densificação em prensa hidráulica equipada com dois pratos aquecidos por resistência elétrica, da marca Siempelkamp (Alemanha). A pressão foi aplicada para obter compactação de 20% e 40%, atingindo 20mm e 15mm de espessura final. Os pratos aquecidos da prensa estiveram em contato com a seção tangencial da madeira e os limitadores de espessura (FIGURA 13-A).

FIGURA 13 – UTILIZAÇÃO DA PRENSA HIDRÁULICA E MEDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A - Detalhe dos limitadores de espessura; B - conexão do termopar na madeira; C - temperatura interna da madeira.

A temperatura interna da madeira durante a aplicação dos tratamentos foi acompanhada utilizando um termopar tipo K conectado a um multímetro Minipa ET-1400 (FIGURA 13-B e C). Para isso foi realizado um orifício de aproximadamente

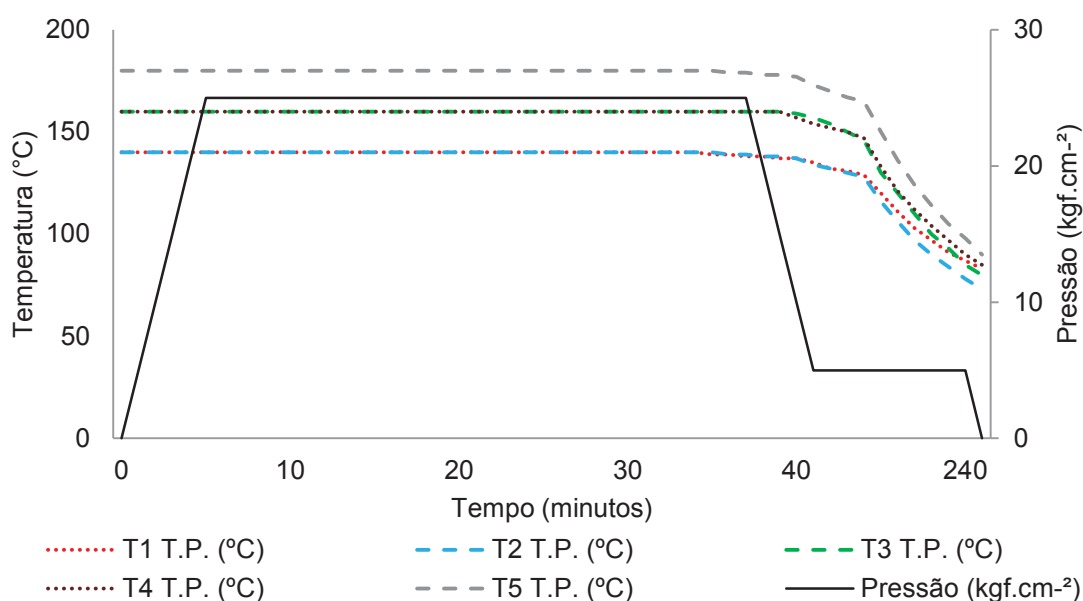
três mm de diâmetro e 30mm de profundidade na metade da espessura da madeira, onde foi inserido o termopar.

As amostras foram comprimidas no sentido perpendicular às fibras utilizando temperatura e pressão. As temperaturas utilizadas nos pratos da prensa foram de 140°C, 160°C e 180°C. Após atingir a temperatura desejada nos pratos a madeira era inserida entre os mesmos e aplicada pressão, com uma rampa de aumento de cinco  $\text{kgf.cm}^{-2}$  a cada minuto até atingir  $25 \pm 3 \text{ kgf.cm}^{-2}$ .

Na condição desejada de temperatura e pressão de cada tratamento, a prensa permanecia fechada por um período de 30 minutos, período determinado em que a temperatura interna da madeira não apresentava oscilação de temperatura maior que dois graus por minuto. Posteriormente aos 30 minutos a temperatura dos pratos era desligada.

Com o início da redução da temperatura interna da madeira a pressão era reduzida utilizando a mesma proporção da rampa inicial, até cinco  $\text{kgf.cm}^{-2}$ , mantendo nesta condição por um período de 240 minutos. Esta fase possibilitou a redução da temperatura interna a aproximadamente 75°C, configurando um pós-tratamento, aliviando a pressão de vapor e liberação das tensões internas presentes no material (FIGURA 14).

FIGURA 14 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA COM AS TEMPERATURAS E PRESSÃO DA PRENSA HIDRÁULICA



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T.P. = temperatura dos pratos da prensa.



A metodologia adotada foi definida em função de pré-testes realizados com o material. No total foram realizadas análises no material natural (testemunha) e em cinco tratamentos de densificação, conforme a TABELA 13.

TABELA 13 - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DOS TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS UTILIZADOS PARA DENSIFICAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE PEÇAS DE *Gmelina arborea*

	Testemunha	Tratamentos				
		140°C T1	140°C T2	160°C T3	160°C T4	180°C T5
Espessura final	25mm	20mm	15mm	20mm	15mm	20mm
Compactação	-	20%	40%	20%	40%	20%
Identificação	Testemunha	140°C↓20%	140°C↓40%	160°C↓20%	160°C↓40%	180°C↓20%
Número de peças	10	10	10	10	10	10

FONTE: O autor (2020).

Finalizado o processo de densificação e pós-tratamento as peças foram acondicionadas em câmara climática (20±2°C de temperatura e 65±5% de umidade relativa do ar) até estabilização de sua massa, para posterior avaliação das propriedades.

## 2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

Para avaliação das propriedades físicas foram utilizadas oito amostras para determinar as seguintes propriedades:

### 2.2.1 Densidade aparente

Amostras com dimensões 100 x 250mm (largura x comprimento) com espessura variando em função do tratamento (EQUAÇÃO 13).

$$\rho_{ap} = \frac{M_{clim}}{V_{clim}} \quad (13)$$

Em que:

$\rho_{ap}$  = densidade aparente após o tratamento (g.cm<sup>-3</sup>);

$M_{clim}$  = massa da peça climatizada (g);

$V_{clim}$  = volume da peça climatizada (cm<sup>3</sup>).

### 2.2.2 Perda de massa

Amostras com dimensões 100 x 250mm (largura x comprimento) com espessura variando em função do tratamento (EQUAÇÃO 14).

$$PM = \frac{(Mi - Mf)}{Mi} * 100 \quad (14)$$

Em que:

PM = perda de massa após o tratamento (%);

Mi = massa inicial (g);

Mf = massa final (g).

### 2.2.3 Teor de umidade de equilíbrio

Amostras com dimensões de 20 x 50mm (largura x comprimento) com espessura variando em função do tratamento (EQUAÇÃO 15), após equilíbrio de massa em câmara climática (20±2°C e 65±5%).

$$TUEq = \frac{(Mi - Mf)}{Mf} * 100 \quad (15)$$

Em que:

TUEq = teor de umidade de equilíbrio (%);

Mi = massa inicial (g);

Mf = massa final (g).

### 2.2.4 Estabilidade dimensional

Foram utilizados 16 amostras por tratamento com dimensões de 20 x 50mm (largura x comprimento) com a espessura variando em função do tratamento aplicado, seguindo recomendações de Esteves et al. (2017).

As amostras foram imersas em água para obtenção do inchamento em espessura e absorção de água após 2, 24, 48 e 72h (EQUAÇÕES 16 e 17). Após completa saturação, as amostras foram submetidas à secagem em estufa (103±2°C) para obtenção da taxa de retorno (TR), conforme EQUAÇÃO 18.

$$IEH = \frac{(EH - Ei)}{Ei} * 100 \quad (16)$$

Em que:

IEH = inchamento em espessura após x horas de imersão em água (%);

EH = espessura após x horas de imersão em água (cm);

Ei = espessura inicial do corpo de prova (cm).

$$AAH = \frac{(MH - Mi)}{Mi} * 100 \quad (17)$$

Em que:

AAH = absorção de água após x horas de imersão (%);

MH = massa após x horas de imersão em água (g);

Mi = massa inicial do corpo de prova (g).

$$TR = \frac{(ExH - Ee)}{ExH} * 100 \quad (18)$$

Em que:

TR = Taxa de retração (%);

ExH = espessura após x horas de imersão em água (cm);

Ee = espessura após secagem na estufa (cm).

### 2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para caracterizar mecanicamente as amostras, foram realizados ensaios destrutivos de dureza Janka e de compressão paralela às fibras seguindo a norma ASTM D143-14 (2014) com adaptações para as dimensões do material e velocidade de carregamento em Máquina Universal de Ensaio (EMIC – DL 30.000).

No ensaio não destrutivo foi usado o aparelho *Stress Wave Timer* (SWT), Modelo 239A, da Metriguard, para leituras de tempo de propagação de ondas tensão em microssegundo ( $\mu$ s). O equipamento é composto por dois transdutores acelerômetros disposto sobre o material a ser medido e um relógio registrador da velocidade da onda.

O processo de medição por meio desse equipamento consistiu na acomodação do corpo de prova entre os dois sensores, soltando um pêndulo que se choca com o sensor e emite uma onda que percorre a amostra longitudinalmente até o sensor receptor.

Cada tratamento contou com dez repetições, sendo que em cada amostra foram realizadas três medições. Dessa forma, foi determinado o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd), conforme EQUAÇÃO 19.

$$MOEd = \rho * V^2 * \left(\frac{1}{g}\right) \quad (19)$$

Em que:

MOEd= módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

V = velocidade (cm.s<sup>-1</sup>);

$\rho$  = densidade (Kg.m<sup>-3</sup>);

g = aceleração da gravidade (9,80665 m.s<sup>-2</sup>).

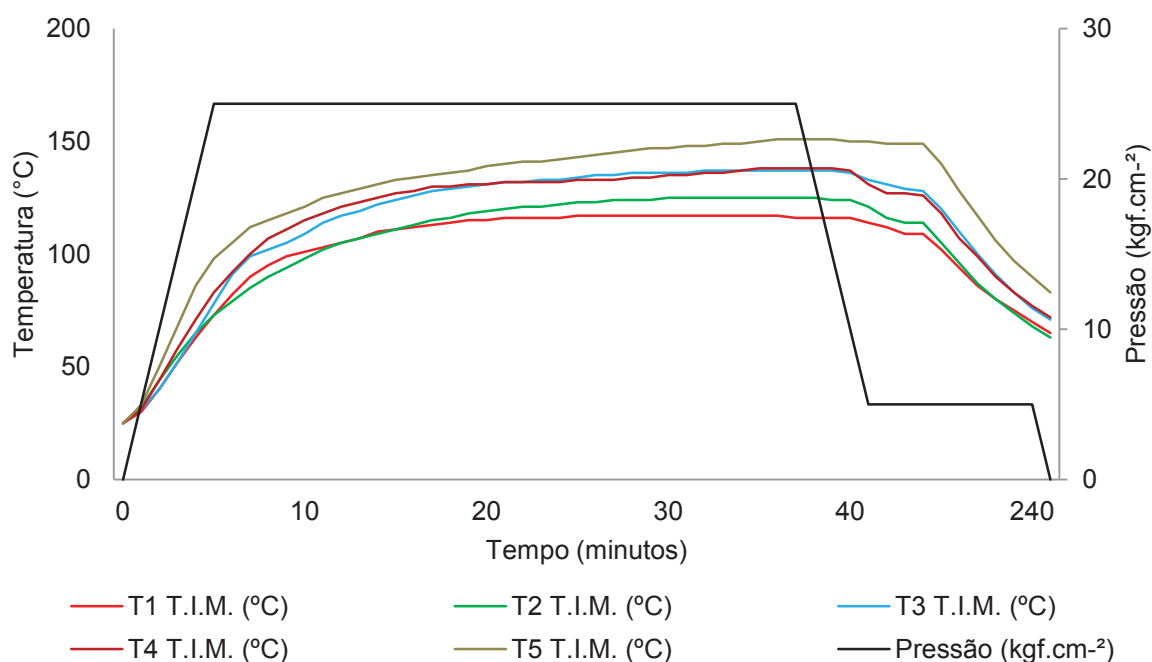
## 2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram tabulados em planilha eletrônica e analisados quanto à homogeneidade da variância (Bartlett e Hartley's) e normalidade dos dados (Kolmogorov – Smirnov). As propriedades foram avaliadas por meio de análise de variância (ANOVA –  $p \leq 0,05$ ), e verificada diferença significativa procedeu-se com o teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação de médias.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O diagrama do processo de densificação termomecânica está representado na FIGURA 15, onde é possível observar a pressão aplicada durante o processo e o comportamento da temperatura interna da madeira em função do tempo.

FIGURA 15 - DIAGRAMA DO PROCESSO DE DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA COM AS TEMPERATURAS INTERNAS DAS MADEIRAS DE *Gmelina arborea* EM CADA TRATAMENTO



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T.I.M. = Temperatura interna da madeira.

A temperatura interna da madeira apresentou um comportamento praticamente linear até a temperatura de 100°C. Esta temperatura foi atingida em tempos de 10, 7 e 5 minutos, correspondente a temperaturas da prensa de 140°C, 160°C e 180°C, respectivamente. Posteriormente houve mudança do comportamento da curva, tendendo à estabilização.

Esta alteração da curvatura pode ser explicada pelo fato da ruptura das ligações químicas iniciarem a temperaturas acima de 100°C, na zona de estabilidade térmica (100°C a 200°C), demandando maior energia para as despolimerizações, a qual é denominada como temperatura inicial de degradação térmica dos principais

componentes da madeira, acentuada acima de 125°C (RANDRIAMANTENA et al., 2009).

Durante o processo observou-se o aumento da temperatura interna da madeira em decorrência do tempo de densificação. Em T1, com temperatura da prensa a 140°C com 20% de compactação (20mm de espessura final), observou-se que a temperatura interna da madeira atingiu o máximo de 117°C. Já em T2, na mesma temperatura, porém com 40% de compactação (15mm de espessura final) a temperatura interna atingiu 125°C.

Para o T3, processo a 160°C com 20% de compactação, a madeira apresentou temperatura interna máxima de 137°C, semelhante a madeiras submetidas à compactação de 40% (T4), que apresentaram temperatura interna máxima de 138°C. No processo utilizando 180°C (T5) a temperatura interna máxima da madeira foi de 151°C.

A densificação com a temperatura de 180°C foi realizada somente até a compactação de 20%. A aplicação de maiores taxas de densificação e temperaturas acima de 180°C resultam em irregularidades no centro das peças (FIGURA 16), colapsos internos e rompimento das fibras, causadas por uma pressão interna de vapor, como observado em testes preliminares, não justificando a aplicação do processo.

FIGURA 16 - ASPECTO IRREGULAR NO CENTRO DA PEÇA (A), RACHADURAS INTERNAS (B) E DESFIBRAMENTO EM MADEIRA DE *Gmelina arborea* DENSIFICADA ACIMA DE 180°C



FONTE: O autor (2020).

Isto ocorreu devido a alterações da parede celular, fechamento das células do lúmen e redução do diâmetro dos poros devido ao processo de compressão com temperatura. Conseqüentemente, há uma limitação para migração da umidade interna para o exterior da peça e quando a pressão dos pratos é aliviada ocorre o desfibramento das amostras.

### 3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

A densidade aparente inicial média para cada tratamento foi analisada estatisticamente indicando a homogeneidade das amostras, restringindo a interferência desta propriedade durante a aplicação de diferentes temperaturas e as reduções em espessura (TABELA 14).

TABELA 14 - DENSIDADE APARENTE INICIAL MÉDIO DAS AMOSTRAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Tratamento	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Testemunha	0,45	0,0163	3,62
T1	0,45	0,0276	6,13
T2	0,45	0,0247	5,49
T3	0,45	0,0235	5,22
T4	0,45	0,0191	4,24
T5	0,45	0,0258	5,73
Média	0,45	0,0222	4,93

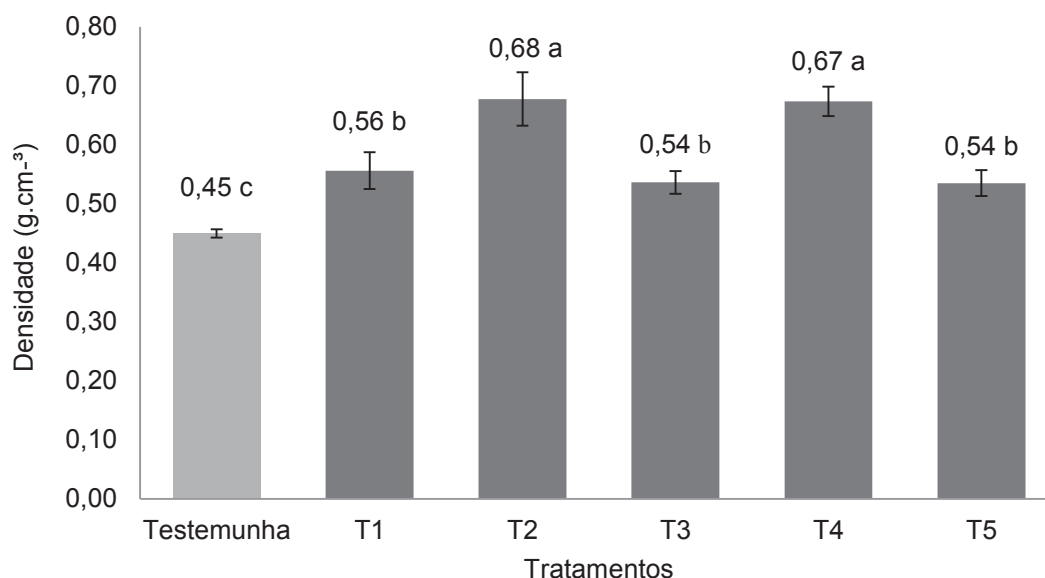
FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%.

Após a densificação, a densidade apresentou aumento de 17% para as situações de 20% de compactação (20mm de espessura final), nas temperaturas de 160°C (T3) e 180°C (T5). O aumento de 50% foi observado para os tratamentos com 40% de compactação (15mm de espessura final), na temperatura de 140°C (T2) e 160°C (T4).

Os maiores valores de densidade foram obtidos para as amostras submetidas à compactação de 40%, T2 (140°C) e T4 (160°C), atingindo 0,68g.cm<sup>-3</sup> e 0,67g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente, diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos. As demais densificações para T3 (160°C↓20%) e T5 (180°C↓20%) atingiram densidade aparente de 0,54g.cm<sup>-3</sup> e 0,56g.cm<sup>-3</sup> para T1 (140°C↓20%) (FIGURA 17).

FIGURA 17 - DENSIDADE APARENTE MÉDIA DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* APÓS A DENSIFICAÇÃO COM DIFERENTES TEMPERATURAS E COMPACTAÇÕES



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.

O aumento de densidade é reflexo da compactação, devido à pressão aplicada. Quanto maior a compactação da madeira, maior a redução dos espaços vazios das amostras e consequente aumento da quantidade de material lenhoso por unidade de volume, elevando a densidade da madeira, conforme relatado por diferentes estudos, afirmando que a densidade aumenta com a taxa de compactação (UNSAI et al., 2011; ARRUDA e DEL MENEZZI, 2013).

Diante de tais resultados, tem-se para a mesma espécie três classes de densidade. Classe A: madeira com compactação de 40% com densidade entre 0,67g.cm<sup>-3</sup> e 0,68g.cm<sup>-3</sup>; Classe B: madeira com compactação de 20% com densidade entre 0,54g.cm<sup>-3</sup> a 0,56g.cm<sup>-3</sup>; Classe C: madeira sem compactação (*in natura*) com densidade de 0,45g.cm<sup>-3</sup>. Ou seja, com o processo modifica-se a madeira, de baixa para média densidade.

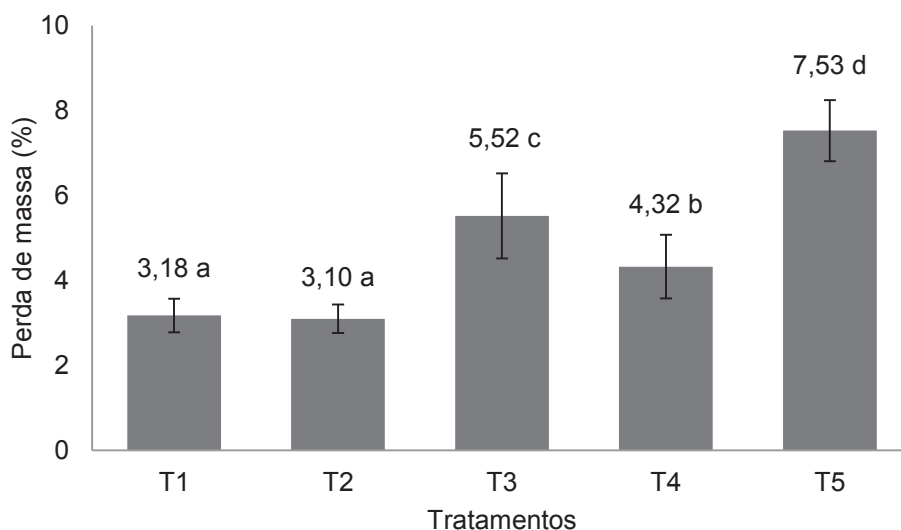
A perda de massa não seguiu o comportamento observado para a densidade, pois a menor perda de massa corresponde aos tratamentos T1 (↓20%) e T2 (↓40%), com temperatura de 140°C, diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos (FIGURA 18). O T5, com maior temperatura (180°C↓20%) apresentou maior temperatura interna, o que possibilitou maior degradação dos polímeros



constituintes da madeira e perda de massa superior em relação aos demais tratamentos.

Quanto mais elevada a temperatura, maior a degradação dos compostos da madeira, conforme relatado por Kacikova et al. 2013; Yin et al. 2017, resultando na perda de massa das amostras, observada com maior evidência no T5, em que a temperatura foi de 180°C na superfície.

FIGURA 18 – PERDA DE MASSA DA DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.

Houve uma tendência na perda de massa em conformidade com o aumento da temperatura, estando de acordo com estudos relatados por Baysal et al. (2014) e Pétrissans et al. (2014). Porém, ocorre uma redução da perda de massa com o aumento da compactação da madeira, verificado entre T1-T2 e T3-T4, com diferença significativa entre T3 e T4. Isto indica que houve redução dos espaços vazios e maior concentração de material lignocelulósico por unidade de área em T2 e T4, tratamentos com maior compactação. Este fato, associado a menor degradação térmica dos componentes, confere-lhes menores perdas de massa e melhores resultados nas propriedades mecânicas.

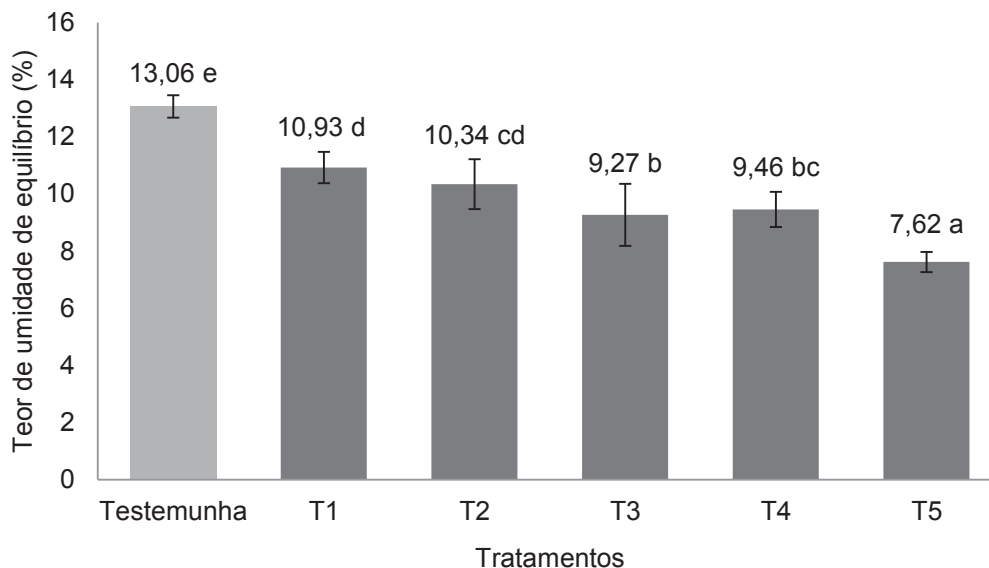
As temperaturas de 140°C e 160°C não foram suficientes para degradar termicamente os componentes mais reativos e instáveis da madeira. Logo, a perda

de massa foi inferior ao tratamento com 180°C, em que tal redução comprometeu a estrutura e composição do material em maior intensidade.

Sabe-se que, no decorrer da densificação, a madeira apresenta alterações em sua composição química (NEYSES et al., 2016; YIN et al., 2017). Além desta alteração, ocorre a modificação da estrutura anatômica, especialmente pela redução do lúmen, resultando em aumento de densidade. A 180°C (T5) ambas as alterações também ocorrem, entretanto, a temperatura elevada proporciona maior degradação dos compostos químicos, como as hemiceluloses, resultando em um material com maior perda de massa, o que reflete em suas propriedades mecânicas, como será observado na sequência.

A análise do teor de umidade de equilíbrio evidencia que o aumento da temperatura reflete na redução desta propriedade das peças densificadas, sendo menor no T5 (180°C↓20%), o qual se diferencia estatisticamente dos demais tratamentos (FIGURA 19).

FIGURA 19 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DAS MADEIRAS DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.

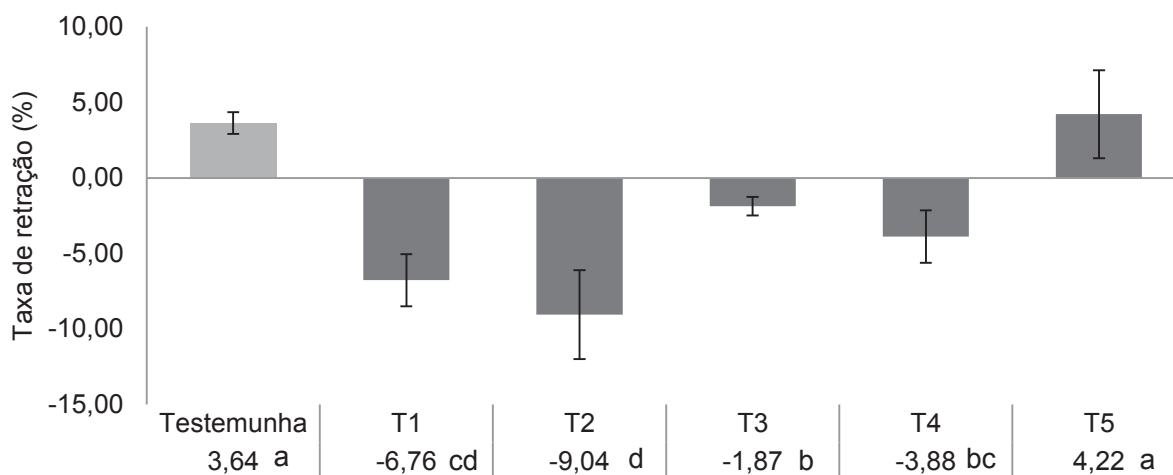
Todos os tratamentos aplicados apresentaram redução significativa do teor de umidade de equilíbrio com a aplicação da densificação. O menor teor de umidade de equilíbrio das madeiras densificadas deve-se às menores proporções de água

adsorvida pela parede celular posteriormente ao tratamento, atribuído ao aumento do índice de cristalinidade da madeira, devido à redução da porção amorfa das hemiceluloses (NAVI e SANDBERG, 2012).

A degradação térmica dos polímeros da madeira, especialmente das hemiceluloses, eleva a proporção de celulose cristalina, o que resulta na minimização da relação entre as moléculas de água e os grupos hidroxílicos da madeira (KOCAEFE et al., 2008b), reduzindo a acessibilidade da água à madeira. Associada ao menor teor de umidade de equilíbrio está a maior perda de massa observada em T5 (180°C↓20%), ocasionada pela degradação das hemiceluloses durante o tratamento (BOONSTRA, 2008), que segundo Morsing (2000) é acentuada acima de temperaturas de 160°C.

As amostras submetidas ao T5 (180°C↓20%) apresentam menor teor de umidade de equilíbrio e maior perda de massa, o que refletiu na taxa de retração das amostras. Este tratamento apresentou taxa positiva de 4,22%, semelhante estatisticamente à madeira natural com taxa de retração equivalente a 3,64% (FIGURA 20). Ou seja, estas amostras apresentam maior capacidade de retornar a sua espessura inicial, posteriormente à imersão em água e secagem até atingirem peso constante, isto é, o efeito *springback* é minimizado. Deste modo, a redução do efeito citado é elencada como ponto positivo, em especial nas situações em que o material é utilizado em ambientes com umidade elevada.

FIGURA 20 - TAXA DE RETRAÇÃO EM ESPESSURA DA MADEIRA NATURAL E AMOSTRAS DENSIFICADAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*



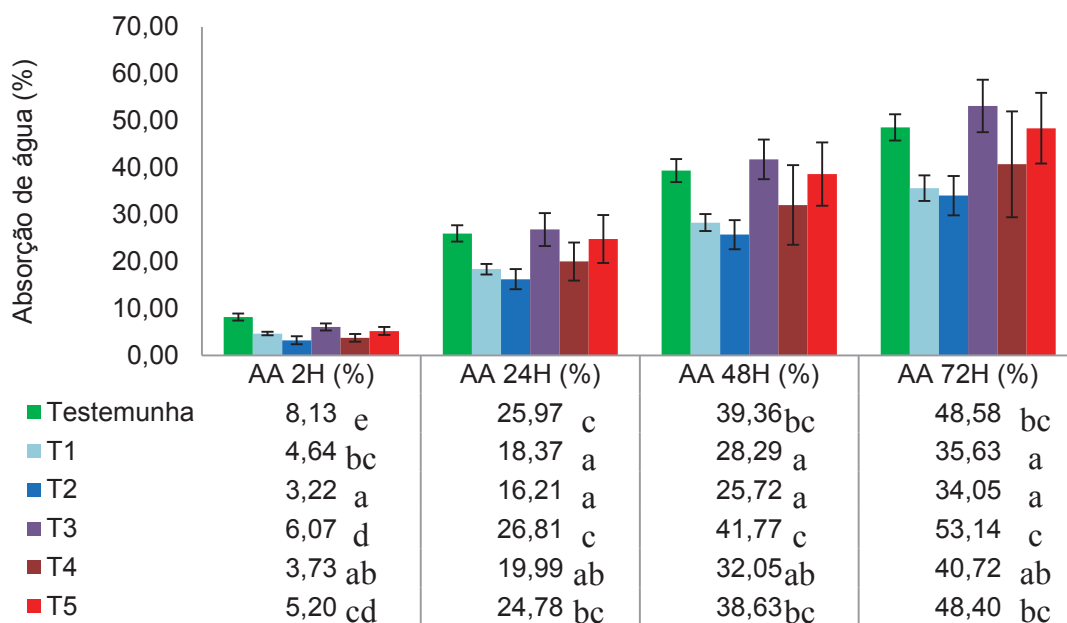
FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.

As amostras de T1, T2, T3 e T4 apresentaram taxa de retração negativa, ou seja, quando estas são imersas em água ocorre um inchamento em espessura, o qual não pode ser revertido totalmente após a secagem. Este efeito é ocasionado pelas tensões internas formadas na estrutura celular e devido ao processo de compressão associado a perdas de umidade pelo efeito da temperatura (PELIT et al., 2014).

As amostras densificadas apresentaram, estatisticamente, absorção de água inferior ou semelhante à testemunha, com destaque para T1, T2 e T4, os quais se mostraram menos suscetíveis à absorção de água nos períodos analisados (FIGURA 21).

FIGURA 21 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA MADEIRA NATURAL E AMOSTRAS DENSIFICADAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.

Apesar do T5 (180°C↓20%) apresentar menor umidade de equilíbrio, este apresentou capacidade semelhante à madeira natural em absorver a água, ambos com os valores mais elevados de absorção, juntamente com o T3 (160°C↓20%). Portanto, a maior temperatura aplicada não foi eficaz em minimizar a absorção de água, pois T1 e T2, com a menor temperatura usada nos tratamentos (140°C), foram os que apresentaram menor propensão de absorção, correspondente a 35,63% e

34,05%, verificado após 72 horas de imersão em água, semelhante estatisticamente ao T4 (160°C↓40%). Já T1 (140°C↓20%) e T2 (140°C↓40%) se diferenciaram estatisticamente de T5 (180°C↓20%), correspondente ao tratamento com maior temperatura assim como da madeira sem o processo de densificação.

Nos tratamentos onde ocorreu maior absorção de água, os vasos que foram comprimidos pelo processo apresentaram capacidade de retornar parcialmente ao seu formato original, permitindo maior absorção de água. Uma vez que a absorção está relacionada com a porosidade e espaços vazios na madeira, os tratamentos com a temperatura de 140°C (T1 e T2) absorveram menos água, assim como o T4 (160°C↓40%), com maior compactação, pois neste período de tempo há absorção de água livre, ocupando os espaços vazios do lume.

Demais fatores podem ter contribuído para este comportamento, como migração de extrativos apolares, reatividade dos compostos, oxidação de superfície, reorientação molecular dos compostos e fechamento dos microporos da madeira (CHRISTIANSEN, 1990; HEGER et al., 2004), fenômeno conhecido como inativação da superfície da madeira. Pertuzzatti et al. (2018) analisando madeira densificada de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis* verificaram que todos os seus tratamentos apresentaram maior taxa de absorção de água em relação à testemunha, diferentemente do observado no presente estudo.

Laskowska et al. (2018) estudando a densificação de madeira de *Quercus robur* L. a 100°C e 150°C observaram absorção de água após 24 horas de imersão equivalente a 73% e 58%, respectivamente, superiores à absorção da madeira não densificada, o que é atribuído às modificações dos compostos químicos da madeira durante o tratamento. Os valores são superiores aos obtidos no presente estudo após 72 horas de imersão em água, indicando que os tratamentos da presente densificação foram mais eficazes para diminuir a absorção de água.

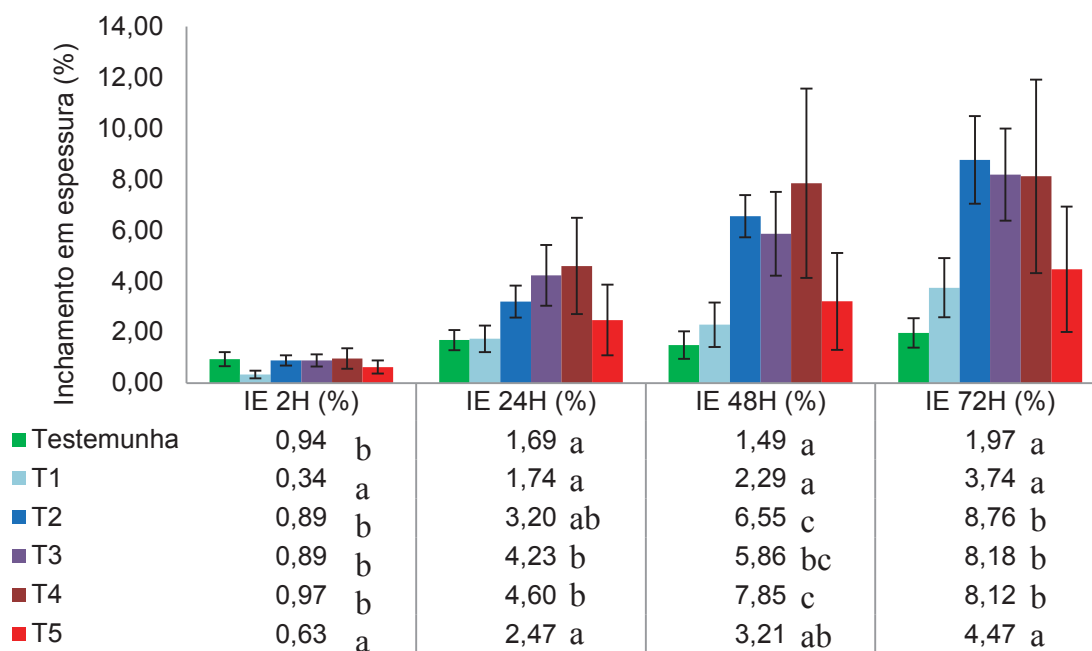
Apesar de ocorrer redução da umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura, devido à indisponibilidade dos grupos hidroxilas, Santos et al. (2012) sugerem que isto pode ocorrer somente em nível superficial. Tal fato pode ser evidenciado neste estudo, em que o tratamento com maior temperatura se mostrou mais hidrofóbico superficialmente (Capítulo 5).

Entretanto, quando submerso em água, as amostras do tratamento T5 (180°C↓20%) apresentaram comportamento de absorção semelhante à testemunha

e ao T3 (160°C↓20%), em que a temperatura de 160°C foi utilizada, isto devido à inativação da superfície.

O inchamento em espessura foi maior em T2, T3 e T4, conforme observado na FIGURA 22, após 72 horas de imersão em água.

FIGURA 22 - INCHAMENTO EM ESPESSURA DA MADEIRA NATURAL E AMOSTRAS DENSIFICADAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.

O menor inchamento em espessura, após 72 horas, ocorreu para a madeira natural, seguida das amostras do T1 (140°C↓20%) e T5(180°C↓20%), formando um grupo que destoa estatisticamente dos demais tratamentos. Porém, para as madeiras densificadas o inchamento foi maior em relação à testemunha, isto devido à dilatação da parede celular, originado da liberação das tensões internas ocasionadas pelo processo de densificação.

Segundo Kocaefe et al. (2008b) e Imirzi et al. (2014) esta tendência de inchamento pode ser atribuída às modificações no conteúdo das hemiceluloses durante o tratamento termomecânico. A madeira densificada pode retornar quase que completamente às suas dimensões originais antes da densificação quando exposta a umidade (Navi e Sandberg 2012), isto devido ao estresse residual armazenado nas células.

Todas as amostras densificadas apresentaram tendência de aumento da espessura, porém, esta recuperação da forma após 72 horas de exposição à água foi inferior a 10%. Este fato indica que os tratamentos e especialmente o pós-tratamento reduziram este efeito, pois logo após o processo de compressão a madeira apresenta elevadas tensões internas nas microfibrilas helicoidais semicristalinas (NAVI e HEGGER, 2004), necessitando de um pós-tratamento para relaxar tais tensões internas evitando a recuperação da espessura original.

Reynolds (2004); Heger et al. (2004) e Navi et al. (2007) analisaram características de inchamento de espécies densificadas e concluíram que para obter inchamento de espessura inferior a 15% era necessário utilizar pós-tratamentos com temperatura de 200°C e umidade relativa em torno de 100%. Porém, tais condições são possíveis somente em sistemas fechados e o conjunto de temperatura, umidade relativa, tempo do processo e características da espécie devem ser consideradas.

Neste estudo, o pós-tratamento resultou em inchamentos inferiores aos relatados na literatura. O inchamento observado em T2 (140°C↓20%), T3 (160°C↓20%) e T4 (160°C↓40%) foi semelhante ao comportamento verificado por Unsal et al. (2011) em madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, os quais encontraram valores superiores de inchamento para as madeiras submetidas a processo de densificação em relação à madeira natural. Porém, os valores corresponderam a inchamentos de 13,33% até 18,07% em 24 horas de imersão em madeiras prensadas a 6MPa a 130°C, após uma semana de imersão em água.

Na literatura é descrito que a compactação influencia diretamente a estabilidade dimensional, com tendência de maiores inchamentos em amostras com maiores taxas de compactação (UNSAL et al., 2011; CAI et al., 2012). Porém, no presente estudo essa relação não se mostrou tão evidente, haja vista que T3 (160°C↓20%), com compactação inferior de T2 (140°C↓40%) e T4 (160°C↓40%), apresentou inchamento semelhante estatisticamente entre os tratamentos citados.

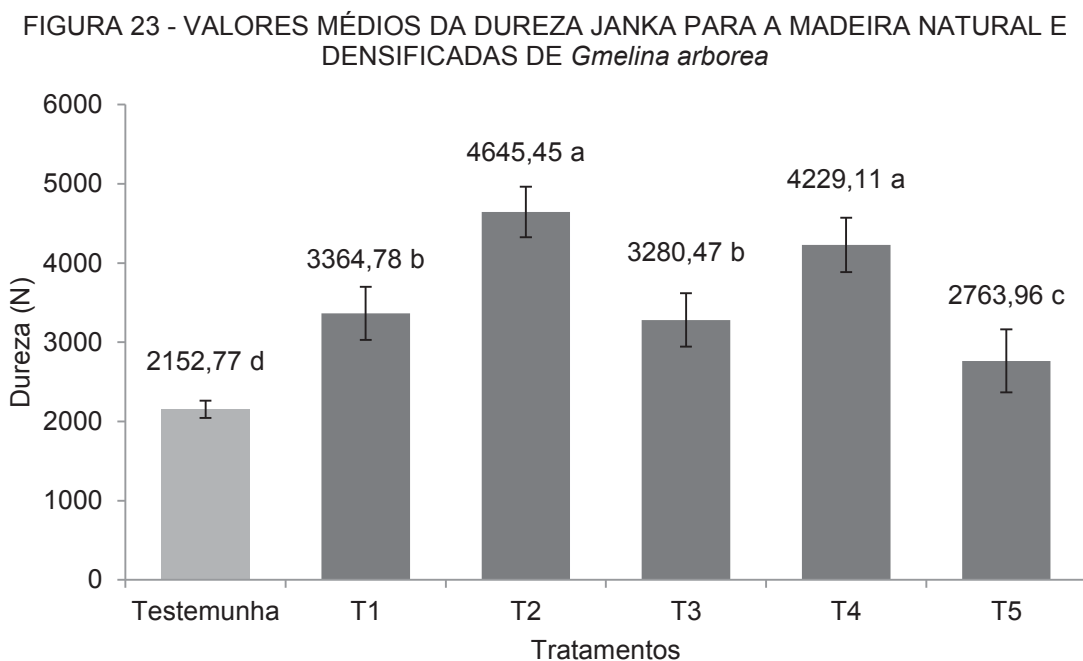
Em análise do inchamento, percebe-se que a densificação obtida pelo processo é parcialmente perdida quando o material entra em contato com a umidade, portanto, não foi possível eliminar por completo o efeito da memória de forma inicial. Navi e Sandberg (2012) relatam que a diminuição do efeito é devido à redução das conexões das microfibrilas de celulose com as hemiceluloses, ou seja, devido à degradação da parte amorfa e conseqüente aumento da cristalinidade. Portanto, a degradação da parte amorfa não ocorreu de forma completa.

Reações químicas ocorridas durante o tratamento levam à diminuição dos grupos hidroxila e carbonila nas paredes celulares da madeira, logo, menos locais de sorção de umidade ficam disponíveis (YIN et al., 2017). Portanto, estas reações em maior ou menor proporção resultam em graus diferentes de fixação da estrutura da madeira densificada.

### 3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Devido ao aumento observado na densidade das amostras densificadas, as propriedades mecânicas avaliadas foram afetadas positivamente, com destaque para T2 (140°C↓40%) e T4 (160°C↓40%), tratamentos estes com maior compactação e maior densidade. Logo, tais tratamentos apresentaram valores superiores para as propriedades dureza Janka, módulo de ruptura (MOR) no ensaio de resistência a compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) em ensaio não destrutivo.

A FIGURA 23 ilustra os valores médios de dureza Janka obtidos para os tratamentos de densificação e a madeira natural.



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.



Para esta propriedade todos os tratamentos apresentaram diferença significativa em relação à testemunha, com destaque para T2 (140°C↓40%) com aumento de 115,78% e T4 (160°C↓40%) com aumento de 96,44%, ambos em relação à dureza da madeira natural. Os tratamentos T1 (140°C↓20%) e T3 (160°C↓20%), com compactação menores se enquadram em um grupo de dureza mediana, entretanto foram superiores estatisticamente ao T5 (180°C↓20%), o qual teve a mesma compactação.

Esta diferença pode estar associada à maior perda de massa do T5 (180°C↓20%) devido à temperatura aplicada, causando uma fragilidade maior das amostras deste tratamento em relação às demais peças densificadas. Portanto esta propriedade é afetada negativamente com a aplicação de temperaturas elevadas, como nesta situação a 180°C, sendo semelhante ao observado por Ulker e Hiziroglu (2017), onde os autores relatam redução da dureza em tratamento com temperatura de 180°C.

Ulker et al. (2012) observaram que a temperatura mais adequada na densificação de *Pinus sylvestris* foi de 120°C, o que aumentou significativamente todas as propriedades mecânicas em comparação com 140°C e 160°C. Já em estudo de Vasconcelos e Del Menezzi (2013) foi verificado que a temperatura de 180°C resultou em valores de dureza e resistência semelhantes ou superiores do observado em tratamento com 200°C para madeira de *Pinus* sp.. Esteves et al. (2017) verificaram aumentos de dureza de 50% a 220% em madeira de *Pinus pinaster*, sendo o maior valor em madeira densificada a 190°C durante 4 horas.

Fang et al. (2012b) densificaram a madeira de *Acer saccharium* a temperaturas de 180°C e 200°C, resultando ambas em um efeito positivo em todas as propriedades avaliadas em comparação com o material não adensado. Para a madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* são relatadas densificações com melhores resultados das propriedades mecânicas na temperatura de 150°C, com tempo de prensagem de 30 e 60 minutos para cada espécie, respectivamente (PERTUZZATTI et al., 2018).

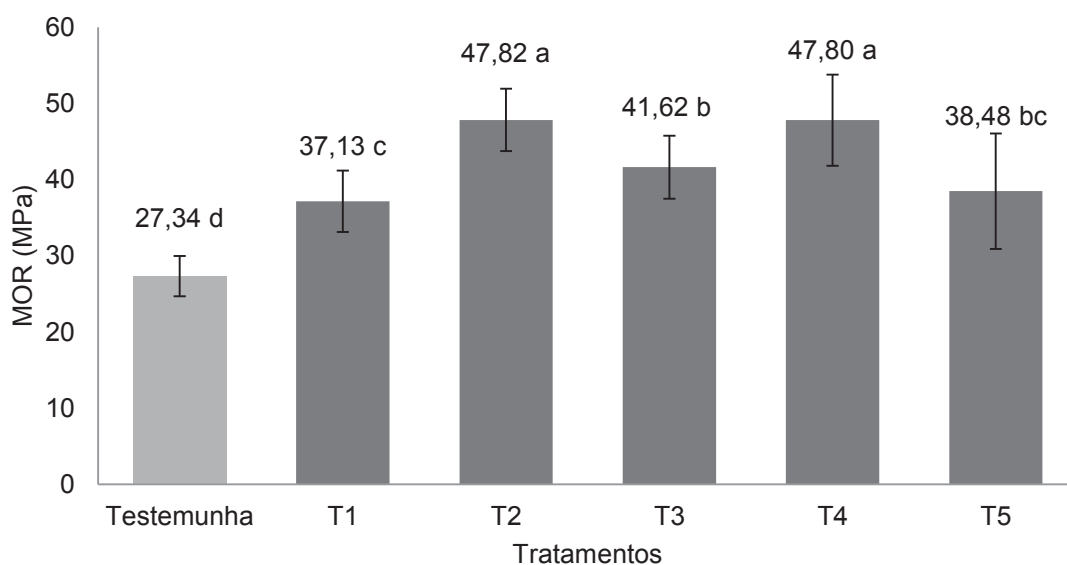
No processo de densificação termomecânica, a camada superficial da madeira é aquecida e comprimida de forma mais rápida em relação à parte central da madeira, conferindo um perfil de densidade em função da espessura da madeira, explicando a melhoria da dureza superficial da madeira densificada, tendo particular

interesse em aplicações onde a superfície é exposta, tais como pisos de madeira, fabricação de móveis de utilidade geral e decorativos.

Corroborando com tal afirmação, Gasparík et al. (2016) citam que a densificação tem efeito maior sobre uma camada mais próxima à superfície do que no restante da amostra. Este fato pode ser observado através da análise da microscopia eletrônica de varredura da seção transversal da madeira densificada (CAPÍTULO 5).

Do mesmo modo que o observado para a dureza Janka, o módulo de ruptura da resistência à compressão foi maior em todos os tratamentos de densificação em relação à madeira natural. Destaca-se T2 (140°C↓40%) e T4 (160°C↓40%), os quais apresentaram os maiores valores de resistência, destoando estatisticamente dos demais tratamentos, que apresentam aumento de resistência de aproximadamente 75% em relação à testemunha (FIGURA 24).

FIGURA 24 - VALORES MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS – MOR (MPa) PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.

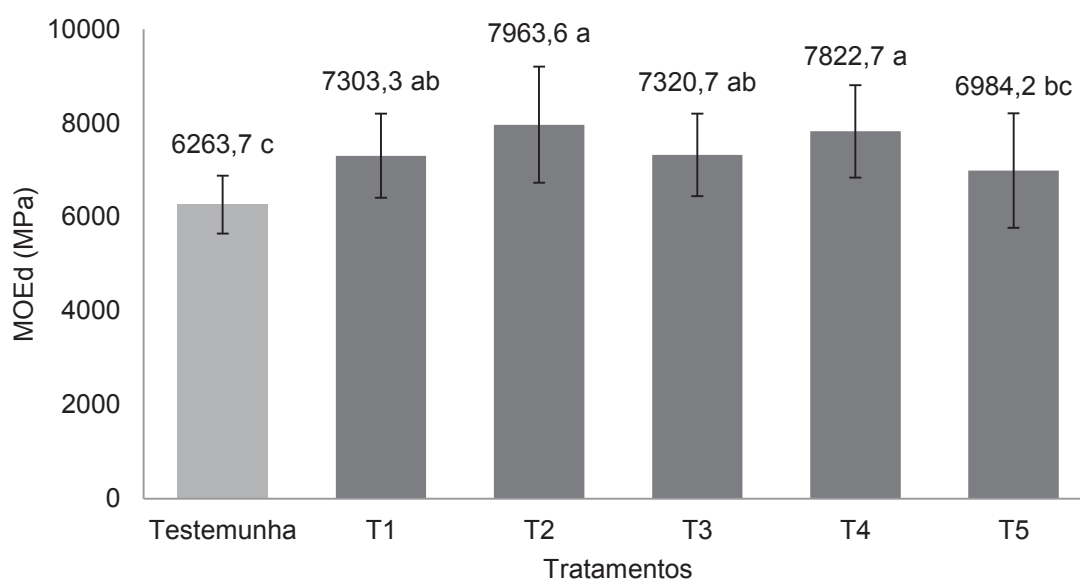
Para os tratamentos com compactação de 20% destaca-se T3 (160°C) seguido de T5 (180°C) e por fim T1(140°C), não seguindo uma sequência lógica em função da temperatura. Bem como observado para a dureza, nota-se um aumento

da resistência com aumento da compactação e da temperatura de 140°C para 160°C.

Porém, de 160°C para 180°C houve uma redução desta propriedade, o que pode ser atribuído à degradação dos constituintes químicos da madeira, especialmente das hemiceluloses e da parte amorfa da celulose (ULKER et al. 2012; CADEMARTORI et al. 2014a; MISSIO et al. 2015), acarretando na redução das propriedades mecânicas avaliadas.

A partir do ensaio não destrutivo determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico da madeira natural e densificadas de *Gmelina arborea*, destacando T1, T2, T3 e T4 com valores estatisticamente iguais e diferindo da madeira natural, que por sua vez foi estatisticamente igual ao T5 (FIGURA 25).

FIGURA 25 - VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO – MOEd (MPa) PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%. As barras nas colunas indicam o desvio padrão.

O maior aumento da propriedade foi observado para T2 (140°C↓40%), com ganho de 27,13% seguido do T4 (160°C↓40%), com aumento de 24,89%, ambos em relação à testemunha. Tais valores são superiores aos observados por Freitas et al. (2016), os quais aplicaram tratamentos termomecânicos em madeira de marupá (*Simarouba amara*) atingindo ganho máximo de 22,85% no MOEd. A degradação das hemiceluloses, redução da matriz lignina-hemicelulose e consequente aumento

na quantidade relativa de celulose cristalina podem ter contribuído para o aumento observado do MOEd (BOONSTRA et al., 2007).

Nota-se que o comportamento de todas as propriedades mecânicas está associado à propriedade densidade, o que pode ser compreendido através de uma análise de correlação de Pearson, onde há uma relação positiva e forte entre tais características. Ou seja, existe uma dependência direta das propriedades mecânicas em função da densidade, a qual se associa com a compactação da estrutura anatômica (TABELA 15).

TABELA 15 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE A DENSIDADE, MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO, DUREZA JANKA E COMPRESSÃO DAS MADEIRAS DENSIFICADAS E NATURAL DE *Gmelina arborea*

Propriedade	Densidade	MOEd	Dureza Janka	Compressão
Densidade	1			
MOEd	0,9575	1		
Dureza Janka	0,9743	0,9464	1	
Compressão	0,9408	0,9707	0,9317	1

FONTE: O autor (2020).

Na aplicação do processo de densificação ocorre a degradação dos constituintes químicos da madeira que pode acarretar em redução de densidade e das propriedades mecânicas, entretanto, a compressão radial a que o material é submetido compensa tal degradação resultando em aumento de densidade e consequentemente das propriedades mecânicas. Porém, o aumento destes valores é observado com maior intensidade para temperaturas de 140°C e 160°C.

A densificação termomecânica realizada com temperaturas mais elevadas, como a aplicada no T5 (180°C↓20%) para madeira de *Gmelina arborea*, resulta em aumento das propriedades mecânicas em relação ao material natural. Entretanto, este acréscimo é, em termos gerais, inferior ao observado nos demais tratamentos, além de não ser justificada economicamente por apresentar maior dispêndio energético.

Destacam-se os resultados obtidos no T2 (140°C↓40%), o qual apresenta superioridade nas propriedades mecânicas e a menor temperatura no processo, portanto, menor consumo energético e consequentemente mais viável economicamente.

## 4 CONCLUSÕES

Todas as condições de densificação possibilitaram aumento da densidade, redução do teor de umidade de equilíbrio e aumento da perda de massa.

As amostras densificadas apresentaram inchamento superior ou igual e absorção de água igual ou inferior em relação à madeira natural, não sendo eficazes em evitar totalmente o efeito *springback*.

As propriedades mecânicas da madeira de *Gmelina arborea* aumentaram com a aplicação das densificações.

A densificação com temperatura de 140°C e compactação de 40% resultou na condição ideal para modificação da madeira de *Gmelina arborea* para fins de aplicação prática.

## **CAPÍTULO 5: EFEITO DA DENSIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS E MORFOLÓGICAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea***

### **1 INTRODUÇÃO**

A percepção visual de alterações nos materiais é considerada subjetiva, principalmente as superficiais e estéticas, pois são diferenciadas em função do observador e da luminosidade. Diante desta subjetividade, alguns métodos e equipamentos foram desenvolvidos e são utilizados para avaliar quantitativamente as interações que ocasionam modificações em uma superfície de uma forma mais precisa.

Dentre as tecnologias utilizadas pode-se citar o sistema CIE  $L^*a^*b^*$ , o qual utiliza parâmetros colorimétricos como luminosidade ( $L^*$ ), coordenadas cromáticas de eixo verde – vermelho ( $a^*$ ) e amarelo – azul ( $b^*$ ), saturação de cor ( $C^*$ ) e ângulo de tinta ( $h$ ) para avaliação e descrição de tonalidades em superfícies sólidas. Com a aplicação deste sistema tem-se a possibilidade de classificar a matéria-prima.

No caso da madeira, esta tecnologia possibilita realizar classificações de propriedades físicas e mecânicas semelhantes (MOYA-ROQUE e MARÍN 2011), analisar a influência de tratamentos térmicos (CADEMARTORI et al., 2013) e avaliações da eficácia de proteções superficiais da ação da fotodegradação (YUAN et al., 2019).

Processos que utilizam temperatura e pressão promovem alterações nas propriedades da madeira. A espectroscopia FTIR é um método prático que pode ser utilizado na caracterização da madeira modificada, revelando diferenças significativas na sua estrutura química, com destaque nas modificações dos grupos OH das madeiras densificadas (GONULTAS et al., 2018). A técnica é normalmente utilizada para analisar as alterações da composição química da superfície de madeiras, assim como grupos funcionais e estruturas dos componentes (FU et al., 2019).

O comportamento da água na superfície da madeira enquadra-se como uma destas alterações, onde se observa formatos de gotas de água diferentes em função do tempo de contato desta com a madeira, e segundo Piao et al. (2010) pode se tornar mais ou menos estável ao longo do tempo. Deste modo, o estudo desta variação indica o nível de energia livre na superfície do material, indicando sua

molhabilidade, que segundo Yuan e Lee (2013) é verificada pela medida do ângulo de contato entre a superfície e o líquido.

Diretamente ligado à molhabilidade está a intensidade de picos e vales do plano do material. Esta indica o quão lisa ou irregular é a superfície, denominada de rugosidade. Para aplicações industriais, a caracterização precisa da rugosidade superficial apresenta importância significativa, essencialmente pela sua considerável influência funcional sobre os produtos manufaturados (WHITEHOUSE, 2011).

Diante disso, a aplicação do calor com pressão tende a deixar a madeira menos porosa, conseqüentemente mais lisa e modificar o desempenho da água sobre a superfície da madeira. Investigações da alteração de cor, molhabilidade e rugosidade foram realizadas em diferentes processos de densificação da madeira (DIOUF et al., 2011; BEKHTA et al., 2014a; BEKHTA et al., 2018), observando as alterações sobre as características superficiais.

Diferentemente de outros processos aplicados na madeira para alterar algumas de suas propriedades, como os tratamentos térmicos, o processo de densificação termomecânica proporciona ao material, além de mudanças positivas nas propriedades físicas e mecânicas, alterações superficiais e morfológicas no material. Estas podem atingir níveis diferentes na madeira em função da combinação de pressão e temperatura.

Tais alterações potencializam o uso desta técnica e podem ser uma alternativa para aplicações da madeira, fundamentadas em fatores estéticos e estruturais, conseqüentemente, agrega-se valor ao produto final do processo.

Portanto, as características de cor, química superficial, molhabilidade, rugosidade e morfologia do material possibilitam avaliar o efeito do processo de densificação termomecânica sobre a superfície e aparência estética da madeira, sendo o foco deste capítulo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização da superfície do material foi realizada através da análise de cor (colorimetria), espectroscopia (FTIR), molhabilidade, rugosidade 3D superficial e microscopia eletrônica de varredura. As amostras foram as mesmas utilizadas no Capítulo 4.

### 2.1 COLORIMETRIA

A avaliação dos parâmetros colorimétricos foi realizada de acordo com o sistema CIE  $L^*a^*b^*$  (1976) utilizando um espectrofotômetro KONICA MINOLTA CM-5 acoplado a um microcomputador. As leituras foram realizadas com abertura do aparelho de 3mm de diâmetro e ângulo de observação de 10°.

Os parâmetros colorimétricos determinados foram:  $L^*$  (luminosidade) onde zero representa o preto e 100 o branco;  $a^*$  (coordenada do eixo vermelho-verde), onde o número positivo indica o vermelho e o negativo o verde;  $b^*$  (coordenada do eixo azul-amarelo), onde o número positivo indica o amarelo e o negativo o azul;  $C$  (saturação) indica a pureza da cor e  $h^*$  (ângulo de tinta) que indica a dominância de uma tonalidade.

Para determinar as alterações na cor da madeira, após o tratamento utilizou-se a variação total da cor ( $\Delta E^*$ ), conforme EQUAÇÃO 23, a qual leva em consideração as diferenças das coordenadas cromáticas e de luminosidade, fornecendo uma visão mais ampla sobre o desempenho das madeiras submetidas ao tratamento termomecânico. Foi realizada a mensuração em quatro pontos, dois na face abaxial e dois na face adaxial, num total de seis amostras de cada tratamento.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^2 * \Delta a^2 * \Delta b^2} \quad (23)$$

Em que:

$\Delta E^*$  = variação total da coloração;

$\Delta L^*$  = variação da luminosidade ( $L^*$  da amostra tratada -  $L^*$  da testemunha);

$\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$  = variação das coordenadas cromáticas (amostra tratada - testemunha).



A variação total de cor foi classificada a partir da tabela de classificação de variação total de cores de madeiras (TABELA 16) elaborada por Hikita et al. (2001).

TABELA 16 - CLASSIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO TOTAL DA COR ( $\Delta E^*$ ) DE MADEIRAS

Varição da cor ( $\Delta E^*$ )	Classificação
0,0 – 0,5	Desprezível
0,6 – 1,5	Ligeiramente perceptível
1,6 – 3,0	Notável
3,1 – 6,0	Apreciável
6,1 – 12,0	Muito apreciável

FONTE: Hikita et al. (2001).

A saturação ( $C$ ) foi calculada pela EQUAÇÃO 20.

$$C = ((a^*)^2 + (b^*)^2)^{0,5} \quad (20)$$

Em que:

$a^*$ = matriz vermelho;

$b^*$ = matriz amarelo.

O ângulo de tinta ( $h^*$ ) foi determinado conforme EQUAÇÃO 21.

$$h^* = \arctang(b^*/a^*) \quad (21)$$

## 2.2 ESPECTROSCOPIA

As amostras da madeira densificadas e natural foram examinadas por espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) de reflexão total atenuada (ATR) para verificar alterações superficiais dos constituintes químicos.

Os espectros foram obtidos em um espectrômetro Alpha Bruker, módulo Alpha-P (Karlsruh, Germany), com cristal de diamante, na faixa espectral de 400 a 4.000 $\text{cm}^{-1}$ , resolução de 4 $\text{cm}^{-1}$  e 32 varreduras em amostras com 2mm de espessura.

## 2.3 MOLHABILIDADE

Para análise da molhabilidade da superfície foi aplicado o método de gota séssil (*Height-Width*) utilizando um goniômetro (Krüss DSA25). Três gotas de água deionizada com volume de 5 $\mu$ L foram depositadas na superfície abaxial e adaxial do material. O ângulo de contato aparente (AC) foi mensurado em tempos pré-determinados (5, 15 e 30 segundos). Foram utilizados seis amostras por tratamento.

## 2.4 RUGOSIDADE 3D SUPERFICIAL

A rugosidade superficial do material foi avaliada utilizando um profilômetro óptico 3D em modo não contato (interferometria de luz branca, Talysurf CCI, Taylor Hobson). Foram determinados, em três pontos da face abaxial e três pontos da face adaxial das amostras, correspondente a um campo de leitura de 0,75mm<sup>2</sup>, os parâmetros Sa (rugosidade média), Sq (rugosidade quadrática média) e Sz (rugosidade total, diferença entre o pico mais alto e o vale mais profundo), conforme a norma ISO 25178.

Complementarmente foram determinados os parâmetros Spk (altura reduzida do pico), Sk (profundidade da rugosidade do núcleo) e Svk (profundidade reduzida do vale) conforme a norma EUR 15178N, com interesse em eliminar efeitos irregulares naturais da superfície (GURAU, 2004), como por exemplo, anormalidades relacionadas com a estrutura anatômica da madeira. O comprimento de amostragem (*cut-off*) foi fixado em 0,025mm e aplicado o filtro Regressão Gaussiana (*Gaussian Regression Filter*) para análise dos dados.

## 2.5 MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE

A morfologia das seções radial, tangencial e transversal do material densificado e não densificado foi analisada por imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram secas, cortadas e metalizadas (via *sputtering*) com uma fina camada de ouro. Sob baixo vácuo e intensidade do feixe de elétrons fixada em 15kV, imagens de alta resolução em diferentes magnificações foram adquiridas no equipamento MEV JEOL JSM 6360-LV.

## 2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

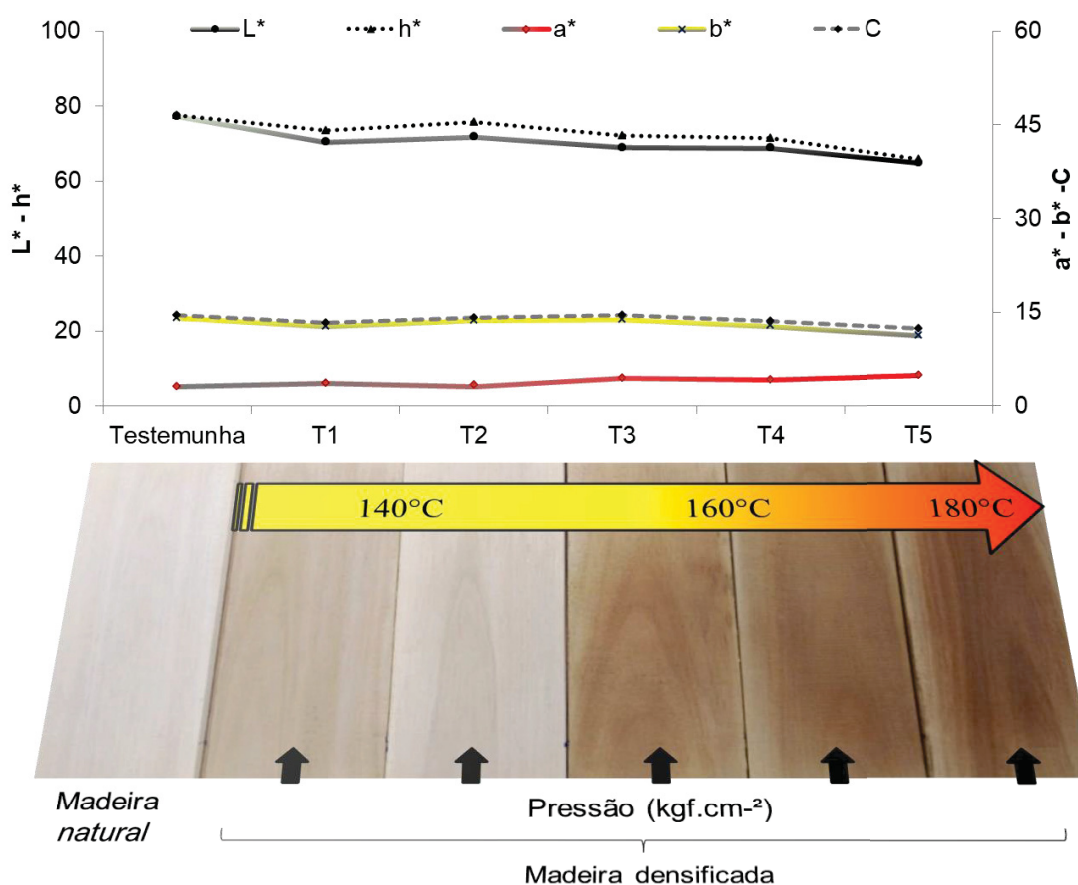
Os dados foram tabulados em planilha eletrônica e analisados quanto à homogeneidade da variância (Bartlett e Hartley's) e normalidade dos dados (Kolmogorov – Smirnov). Os parâmetros colorimétricos, ângulo de contato e de rugosidade foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA –  $p \leq 0,05$ ) e verificada diferença significativa procedeu-se com o teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação de médias.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 EFEITO DA DENSIFICAÇÃO NA COLORIMETRIA DA MADEIRA

As amostras da madeira de *Gmelina arborea* natural e densificadas foram caracterizadas e comparadas pelo sistema CIEL\*a\*b\* 1976, possibilitando identificar que a partir da madeira natural até o T5 (180°C↓20%) ocorre uma redução da luminosidade ( $L^*$ ), associada com a intensificação do pigmento vermelho ( $a^*$ ) e redução da tonalidade amarela ( $b^*$ ). Conseqüentemente, a madeira apresenta uma tonalidade mais escura, sendo esta alteração verificada com maior magnitude no T5 (FIGURA 26).

FIGURA 26 - PARÂMETROS  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C E  $h^*$  E ASPECTO VISUAL DAS AMOSTRAS DE *Gmelina arborea* EM CONDIÇÃO NATURAL E APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS DE DENSIFICAÇÃO



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA:  $L^*$  = Luminosidade;  $a^*$  e  $b^*$  = Coordenadas cromáticas; C = Saturação;  $h^*$  = Ângulo de tinta. T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%.

A temperatura de 140°C utilizada nos tratamentos T1 e T2 pode não ter ocasionado a migração total dos compostos químicos à superfície, o que reflete em tons mais semelhantes à cor natural da madeira. Entre estas, nota-se que T1(140°C↓20%) apresenta coloração levemente mais escura que T2 (140°C↓40%), o que pode ser explicado pela natureza complexa da madeira, em especial por maiores teores de extrativos nas amostras utilizadas neste tratamento.

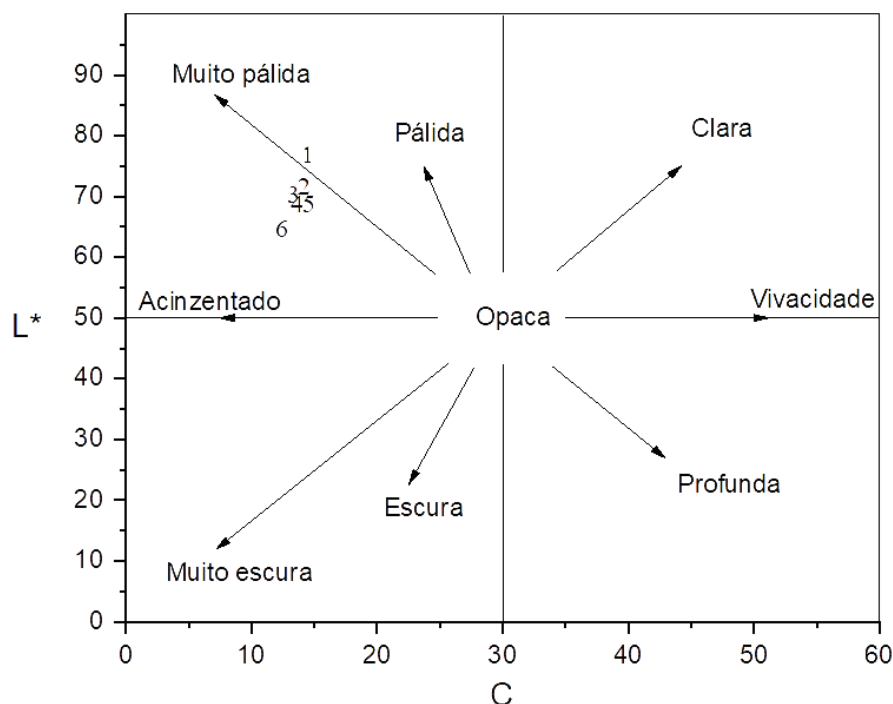
Pela análise visual das peças observa-se que ocorreu um destaque da coloração no lenho tardio das amostras densificadas, resultando em certa heterogeneidade de cores evidenciado nos tratamentos T3, T4 e T5. Este fato é atribuído a composição química heterogênea dos anéis (ATIK et al., 2013), em especial à maior presença de extrativos nesta região da madeira (lenho tardio), conseqüentemente houve maior migração destes componentes para a superfície com a aplicação de temperaturas acima de 160°C, adquirindo uma tonalidade mais escura, como conseqüência da ação da temperatura na madeira (DIOUF et al., 2011; SHESHMANI, 2013).

O ângulo de tinta é resultante das matrizes cromáticas  $a^*$  e  $b^*$  apresentando o comportamento dos tratamentos mais semelhante à coordenada cromática amarelo – azul ( $b^*$ ), devido ao valor desse parâmetro ser maior em comparação a coordenada cromática verde – vermelho ( $a^*$ ). A redução do ângulo de tinta sugere a homogeneização da cor da madeira após o tratamento (PINCELLI et al., 2012).

A curva do ângulo de tinta segue a tendência da curva do parâmetro  $L^*$ . Isto ocorre gradualmente em função do tratamento aplicado, pois há minimização dos pigmentos mais claros, amarelo e verde, e aumento das pigmentações mais escuras, azul e vermelho.

Do mesmo modo, a saturação ( $C^*$ ) que é dependente das matrizes cromáticas  $a^*$  e  $b^*$ , apresentou comportamento próximo ao observado no parâmetro  $h^*$ , pois de modo geral os valores superiores da matriz  $b^*$  apresentam maior influência neste parâmetro em comparação à matriz  $a^*$ , tendendo as cores, para tonalidades menos claras em conformidade com o aumento da temperatura dos tratamentos. As alterações supracitadas podem ser observadas no diagrama  $L^* \times C$  (FIGURA 27).

FIGURA 27 - DIAGRAMA DE LUMINOSIDADE ( $L^*$ ) X SATURAÇÃO (C) DAS AMOSTRAS DE *Gmelina arborea* EM CONDIÇÃO NATURAL E TRATADAS



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: 1 = Testemunha; 2 = Tratamento 1 (T1 = 140°C↓20%); 3 = Tratamento 2 (T2 = 140°C↓40%); 4 = Tratamento 3 (T3 = 160°C↓20%); 5 = Tratamento 4 (T4 = 160°C↓40%); 6 = Tratamento 5 (T5 = 180°C↓20%).

A madeira natural apresenta tonalidade entre pálida e muito pálida. Com a aplicação da densificação, esta foi alterada para tons mais próximos do acinzentado, com maior evidência quando aplicada o T5, com maior temperatura (180°C). A luminosidade ( $L^*$ ) e a coordenada cromática  $a^*$  (verde – vermelho) foram diferentes estatisticamente entre a testemunha e os tratamentos, indicando que a densificação reduz a luminosidade e a pigmentação verde da madeira (TABELA 17).

TABELA 17 - VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS AMOSTRAS DE *Gmelina arborea* EM CONDIÇÃO NATURAL E DENSIFICADAS

Tratamento	$L^*$	$a^*$	$b^*$	C	$h^*$
Testemunha	77,24 a	3,15 a	14,17 a	14,52 a	77,45 a
T1 (140°C↓20%)	70,49 bc	3,75 b	12,79 b	13,34 c	73,51 b
T2 (140°C↓40%)	71,84 b	3,48 b	13,75 a	14,19 ab	75,75 a
T3 (160°C↓20%)	69,03 c	4,46 c	13,85 a	14,57 a	72,05 bc
T4 (160°C↓40%)	68,97 c	4,28 c	12,88 b	13,59 bc	71,50 c
T5 (180°C↓20%)	64,93 d	4,93 d	11,32 c	12,39 d	65,78 d

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA:  $L^*$  = Luminosidade;  $a^*$  e  $b^*$  = Coordenadas cromáticas; C = Saturação;  $h^*$  = Ângulo de tinta. Os valores em uma coluna seguidos por uma mesma letra não apresentam diferença estatística pelo Teste de Médias de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A partir dos valores médios da luminosidade da madeira ( $L^*$ ), evidencia-se que tal parâmetro foi modificado com a aplicação da densificação, reduzindo com o aumento da temperatura, e conseqüentemente, tornando a madeira mais escura. A compactação não alterou a luminosidade, pois entre os tratamentos com mesma temperatura não apresentou diferença estatística significativa entre si. Foram identificadas diferenças significativas entre as variações de temperatura, sendo igual estatisticamente somente entre as temperaturas do T1 (140°C↓20%) com T3 (160°C↓20%) e T4 (160°C↓40%).

Tais diferenças também foram percebidas para o parâmetro  $a^*$  em função da elevação da pigmentação vermelha. Observou-se o aumento desta propriedade com aumento da temperatura, o que altera a intensidade da pigmentação da madeira da tonalidade verde para vermelho. Nos tratamentos com mesma temperatura (T1 e T2 / T3 e T4), a maior taxa de densificação (T2 e T4) resultou no valor do parâmetro inferior aos tratamentos com menor taxa de densificação (T1 e T3), porém sem diferença significativa.

As amostras testemunhas apresentaram uma intensidade maior de pigmentação amarela ( $b^*$ ) em comparação às peças densificadas, porém não foram diferentes estatisticamente de T2 e T3, indicando não variação de tal pigmentação entre os tratamentos. Já o T5 apresentou o menor valor médio, com uma tonalidade mais intensa da cor azul, diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos.

O parâmetro  $\Delta L^*$  apresentou uma configuração de decréscimo conforme aumenta a temperatura de densificação, e quanto mais negativo o valor de  $\Delta L^*$  maior a modificação da coloração. O parâmetro  $\Delta a^*$  apresentou acréscimo com a evolução da temperatura. Já para o parâmetro  $\Delta b^*$  ocorreu redução em relação à testemunha para todos os tratamentos, porém não havendo uma sequência ordenada em função do aumento da temperatura e da compactação (TABELA 18).

TABELA 18 - VARIAÇÕES PERCENTUAIS ENTRE OS VALORES DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS AMOSTRAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS DE DENSIFICAÇÃO EM RELAÇÃO AO ESTADO NATURAL DA MADEIRA

Relação	$\Delta L^*$ (%)	$\Delta a^*$ (%)	$\Delta b^*$ (%)
T1 x Testemunha	-8,74	19,05	-9,74
T2 x Testemunha	-6,99	10,48	-2,96
T3 x Testemunha	-10,63	41,59	-2,26
T4 x Testemunha	-10,71	35,87	-9,10
T5 x Testemunha	-15,94	56,51	-20,11

FONTE: O autor (2020).

Quanto mais afastados do valor zero (0) se apresentarem os valores dos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$  mais intensos serão os pigmentos da madeira, ou seja, menos neutra ou cinza é a cor da madeira. Esta neutralidade da cor é menos evidente na relação T5 x Testemunha, que associada à variação da luminosidade ( $\Delta L^*$ ) de -15,94% resultam em um grau de coloração mais escura e intensa de pigmentos azuis e vermelhos.

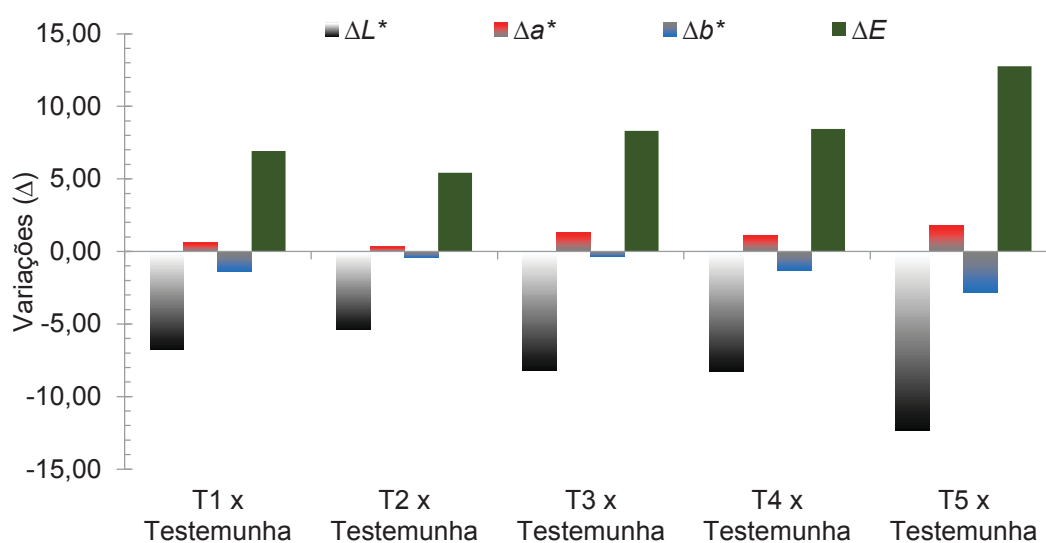
Já na relação entre T2 x Testemunha, nota-se que a partir da combinação cromática, a cor da madeira se aproximou a tons mais neutros, ou seja, com cor próxima ao cinza. Nota-se que para o  $\Delta L^*$  todos os tratamentos apresentaram valores negativos, sendo a menor variação correspondente a -6,99% na relação T2 x Testemunha. Esta relação (T2 x Testemunha) também apresentou menor valor do parâmetro  $\Delta a^*$ , correspondente a 10,48%.

No  $\Delta b^*$  a menor variação foi observada entre o T3 x Testemunha, equivalente a -2,26%. As maiores diferenças entre os valores colorimétricos foram observadas na relação T5 x Testemunha, correspondendo a -15,94%, 56,51% e -20,11% para os parâmetros  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ , respectivamente. Ou seja, o tratamento com a temperatura mais elevada resultou em mudança mais elevada dos parâmetros colorimétricos em relação à cor natural da madeira.

Portanto, a utilização da maior temperatura (T5) nas amostras, apresenta a maior variação total da cor ( $\Delta E^*$ ), influenciada, principalmente, pela redução da luminosidade da madeira ( $\Delta L^*$ ), correspondente a -12,31 e redução da matiz  $\Delta b^*$  (-2,85). Isto deve-se ao aumento da pigmentação azul e devido à elevação da matiz  $\Delta a^*$  (1,78), em função do aumento da pigmentação vermelha (FIGURA 28).



FIGURA 28 - VARIÇÕES OCORRIDAS ENTRE OS VALORES DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS AMOSTRAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea* APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS DE DENSIFICAÇÃO EM RELAÇÃO À MADEIRA NATURAL



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%.

Esta sequência de influência na variação total da cor só não foi observada entre T3 x Testemunha, onde a matiz  $\Delta b^*$  apresentou menor influência do que a matiz  $\Delta a^*$  (1,31) o que indica uma pigmentação mais avermelhada da madeira em relação à testemunha e um valor praticamente neutro da matiz  $\Delta b^*$ , equivalente a -0,32, muito semelhante à tonalidade natural da madeira neste parâmetro.

De acordo com a tabela proposta por Hikita et al. (2001) a variação de cor do T2 (140°C↓40%) em relação a testemunha é considerada apreciável. Para os demais tratamentos a alteração foi mais significativa, considerada muito apreciável.

Tais alterações na coloração da madeira são atribuídas às modificações dos compostos químicos pelo efeito da temperatura, como hemiceluloses e extrativos (CADEMARTORI et al., 2014a; TOMAK et al., 2014; HIDAYAT et al., 2015), sendo intensificadas com a elevação desta variável. Esta alteração colorimétrica é entendida como fator positivo, pois pode ser mais atraente do ponto de vista estético.

Vale ressaltar que a diferença entre a coloração da madeira natural e das densificadas à temperatura de 140°C não foi tão impactante, obtendo-se um material de média a alta densidade com coloração menos escura do que madeiras tradicionais com densidades deste patamar.

Fortes correlações entre as variáveis colorimétricas e o teor de umidade de equilíbrio foram encontradas (TABELA 19). Destaca-se a correlação forte e positiva para a luminosidade e teor de umidade de equilíbrio (0,9963), o que indica que a alteração de uma acarreta em uma modificação praticamente linear na outra variável.

TABELA 19 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE O TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO E OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C$  E  $h^*$

	T.U. eq.	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C$	$h^*$
T.U. eq.	1					
$L^*$	0,9963	1				
$a^*$	-0,9599	-0,9397	1			
$b^*$	0,8114	0,8132	-0,7336	1		
$C$	0,7213	0,7291	-0,6163	0,9867	1	
$h^*$	0,9524	0,9385	-0,9564	0,8941	0,8097	1

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T.U. eq. = Teor de umidade de equilíbrio;  $L^*$  = Luminosidade;  $a^*$  e  $b^*$  = Coordenadas cromáticas;  $C$  = Saturação;  $h^*$  = Ângulo de tinta.

Tais correlações relacionam-se com a alteração química, como a migração de extrativos e degradação das hemiceluloses, alterando sua tonalidade e reduzindo a acessibilidade da água a madeira. O parâmetro  $a^*$  apresentou uma associação forte e negativa com o teor de umidade de equilíbrio, ou seja, uma redução desta propriedade causou efeito contrário na coordenada  $a^*$ , devido ao aumento da pigmentação vermelha da madeira. A alteração da cor pressupõe uma alteração no teor de umidade de equilíbrio, corroborando com a literatura (BUDAKÇI et al., 2012; BAAR et al., 2019).

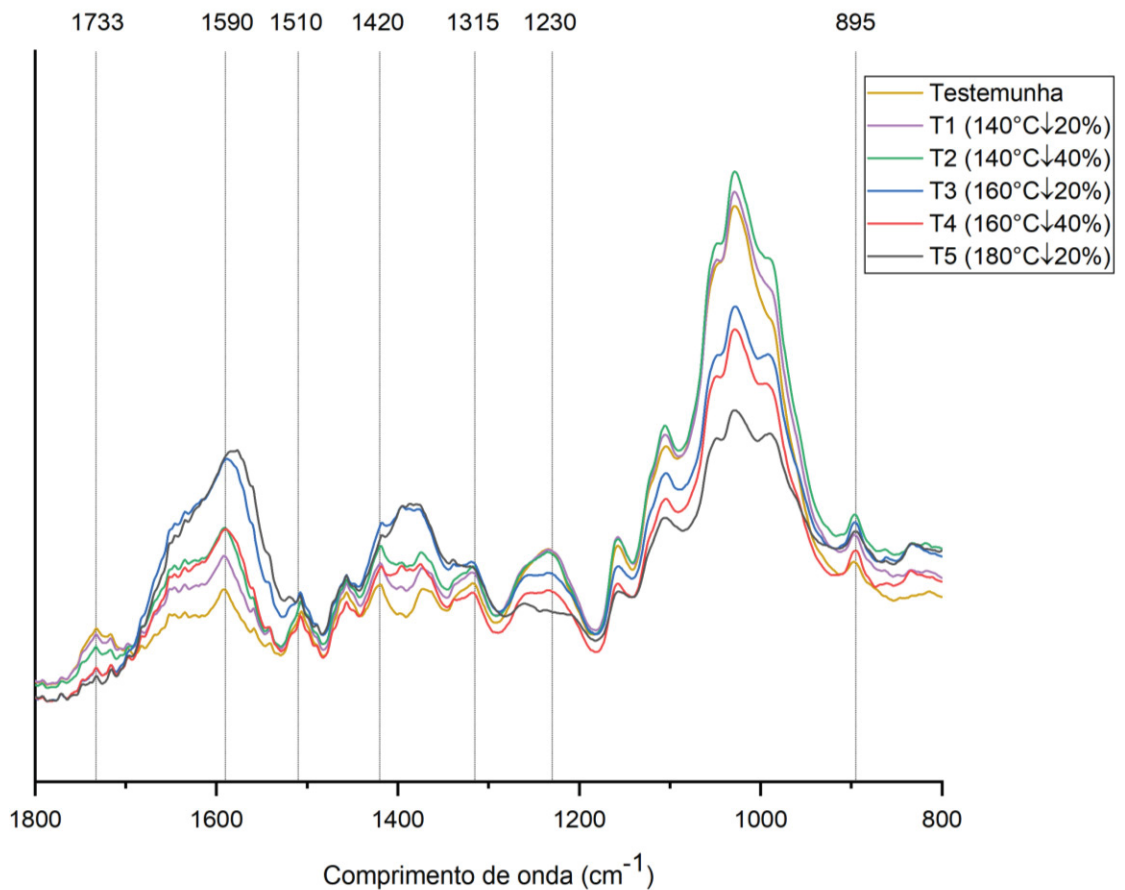
A aplicação do processo é passível de uso para obtenção de diferentes tons colorimétricos da madeira associado a modificações positivas das propriedades físicas, potencializando o uso para uma mesma espécie conforme a preferência do mercado consumidor, alterando os parâmetros do processo.

### 3.2 ALTERAÇÕES QUÍMICAS SUPERFICIAIS ANALISADAS POR ESPECTROSCOPIA FTIR

As principais alterações químicas observadas após a aplicação da densificação termomecânica foram identificadas por meio de intensidades de picos, em especial no intervalo entre  $1800\text{cm}^{-1}$  e  $800\text{cm}^{-1}$ , denominada como a região de

identidade da madeira. Na FIGURA 29 é possível visualizar os espectros médios obtidos para a madeira natural e densificadas.

FIGURA 29. ESPECTROS ATR-FTIR DE AMOSTRAS SUPERFICIAIS DE MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*



Fonte: O autor (2020).

Na região de 1733cm<sup>-1</sup> é possível perceber a menor intensidade de picos em função do tratamento aplicado. Normalmente atribui-se alteração neste pico ao alongamento de grupos carbonila (C=O) em hemiceluloses, lignina e extrativos (FU et al., 2019), com picos de intensidades decrescentes seguindo uma ordem da madeira natural ao T5, de maior temperatura, sugerindo a clivagem de grupos éster associados à decomposição de polissacarídeos de hemiceluloses (INARI et al., 2006).

Este fato resulta aumento relativo do conteúdo de outros componentes, consequentemente torna a superfície da madeira densificada mais hidrofóbica, que é comprovado pela análise do ângulo de contato da face tangencial, superior nas amostras densificadas em relação à madeira natural (FIGURA 32).

Próximo a  $1590\text{cm}^{-1}$  e  $1510\text{cm}^{-1}$ , associados à vibração esquelética aromática da lignina (GUO et al., 2015; BAO et al., 2018), nota-se um alargamento dos picos dos tratamentos de densificação associado a um pequeno deslocamento para um comprimento de onda maior na região de  $1510\text{cm}^{-1}$ , que pode ser causado pela divisão da cadeia lateral alifática nas reações de lignina (WINDEISEN et al., 2008; BAO et al., 2018).

Nas proximidades da região  $1230\text{cm}^{-1}$ , correspondente à banda de absorção de C=O (DIOUF et al., 2011), percebe-se que T5 ( $180^{\circ}\text{C}\downarrow 20\%$ ), T4 ( $160^{\circ}\text{C}\downarrow 40\%$ ) e T3 ( $160^{\circ}\text{C}\downarrow 20\%$ ), tratamentos com maior temperatura, destoam dos demais, com redução da intensidade dos picos. Atribui-se a isto a degradação da hemicelulose, intensificada gradativamente da madeira natural para o T5 ( $180^{\circ}\text{C}\downarrow 20\%$ ), de maior temperatura.

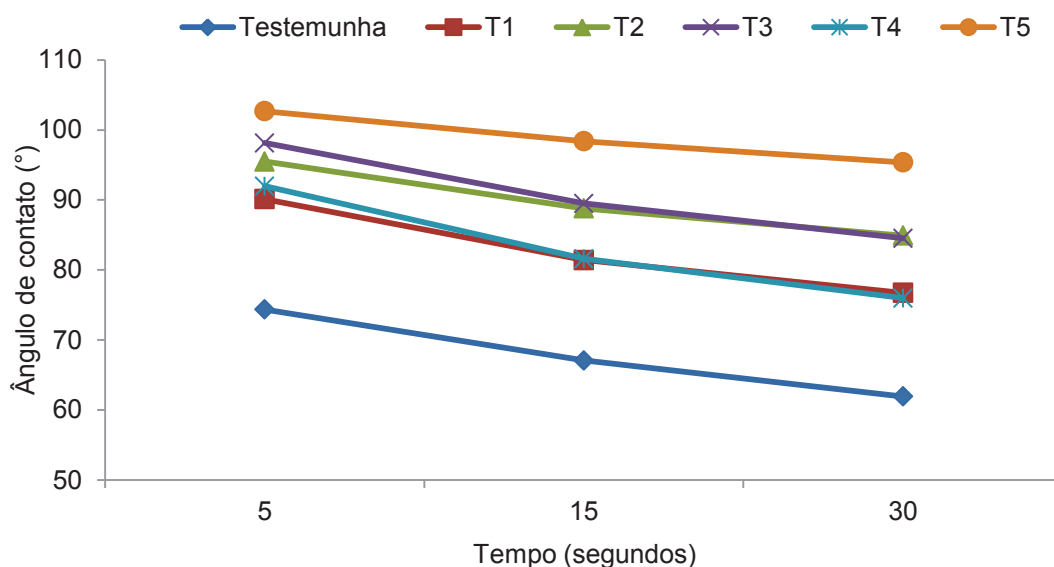
Intensidades de picos nas regiões  $1420\text{cm}^{-1}$ ,  $1315\text{cm}^{-1}$  e  $895\text{cm}^{-1}$  foram percebidas para as amostras densificadas. Tais alterações são decorridas da vibração de flexão, atribuídas à celulose (DIOUF et al., 2011), o que indica aumento relativo da mesma após a densificação.

A análise (ATR-FTIR), usada para analisar estruturas de componentes de madeira natural e densificada, especificamente grupos funcionais químicos, indicou certo grau de degradação, em especial das hemiceluloses. Esta alteração reflete diretamente em propriedades físicas, como teor de umidade de equilíbrio e propriedades superficiais, em especial ao comportamento mais hidrofóbico da superfície tangencial da madeira densificada em relação à madeira natural.

### 3.3 EFEITO DA DENSIFICAÇÃO NA MOLHABILIDADE DA MADEIRA

A evolução do ângulo de contato aparente formado após a deposição da gota de água sobre a superfície da madeira natural e densificadas em função do tempo está ilustrada na FIGURA 30. A superfície com maior molhabilidade apresentou menor ângulo, correspondendo à testemunha e a menor molhabilidade é atribuída às madeiras densificadas. Isto sinaliza que o processo de densificação termomecânico reduz a absorção ou espalhamento da água na superfície tangencial da madeira, proporcionando um efeito selante na superfície tangencial de madeiras densificadas.

FIGURA 30 - COMPORTAMENTO DO ÂNGULO DE CONTATO APARENTE PARA O A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DEPOSIÇÃO DA GOTÍCULA NA SUPERFÍCIE TANGENCIAL DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

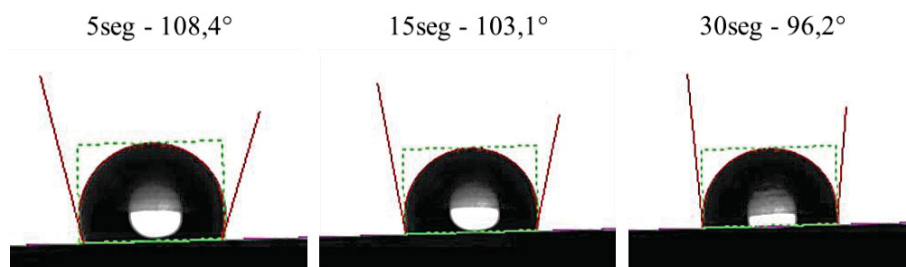


FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%.

Em termos gerais, ângulo de contato inferior a 90° indica uma superfície mais hidrofílica e acima de 90° a superfície mostra-se mais hidrofóbica. As densificações possibilitaram alterar as faces da madeira de hidrofílica para hidrofóbica, principalmente em análise após cinco segundos. Com o passar do tempo o formato da gota vai se modificando alterando assim o ângulo de contato aparente (FIGURA 31).

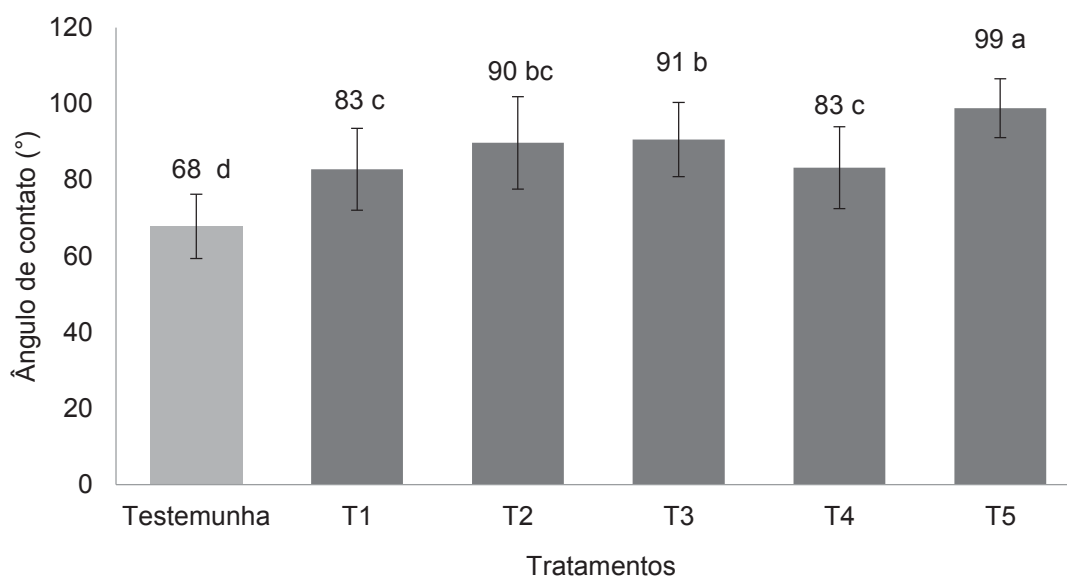
FIGURA 31 - COMPORTAMENTO DA GOTA DE ÁGUA E DO ÂNGULO DE CONTATO APARENTE AO LONGO DO TEMPO EM MADEIRA DENSIFICADA DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

Após 30 segundos, percebe-se, nas madeiras densificadas, um ângulo de contato aparente final médio diferente estatisticamente da madeira natural (FIGURA 32).

FIGURA 32 - ÂNGULO DE CONTATO APARENTE MÉDIO DA SUPERFÍCIE TANGENCIAL PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%.

A testemunha apresentou o menor ângulo de contato aparente, portanto mais molhável, o que se deve à sua estrutura mais porosa e maior quantidade de grupos hidroxila na superfície em relação aos tratamentos de densificação. A superfície natural facilita a absorção e espalhamento da gota de água.

Isto indica que nos tratamentos de densificação houve interação de fatores físicos e químicos que modificaram a superfície. Tais fenômenos, como fechamento parcial dos poros e redução dos grupos hidroxila da superfície tangencial, que esteve em contato direto com os pratos aquecidos, tornaram a superfície mais hidrofóbica, com maior ênfase na temperatura mais elevada, correspondente a 180°C.

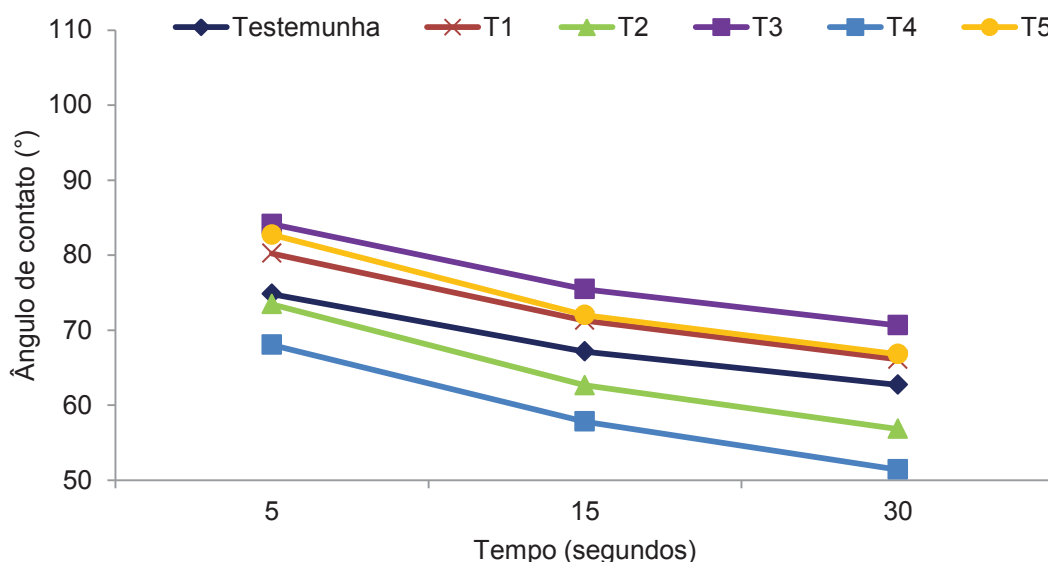
Similares aos resultados obtidos para a seção tangencial, Pertuzzatti et al. (2018) cita ângulo de contato para madeira densificada variando de 87° a 94° em *Pinus elliottii* e ângulos acima de 90° para *Eucalyptus grandis*, entre 2 e 10 segundos de deposição do líquido. No mesmo enfoque, Bekhta e Krystofiak (2016)

observaram redução da molhabilidade na densificação de lâminas de *Alnus glutinosa*, *Fagus sylvatica*, *Betula verrucosa* e *Pinus sylvestris* em temperaturas de 150°C e 200°C, com ângulo de contato máximo próximo a 80°. Aumentos do ângulo de contato de madeira densificada em relação à madeira natural também são relatados por Arruda e Del Menezzi (2013) e Bekhta et al. (2018), ambos usando processos termomecânicos em lâminas de madeira.

Uma tendência geral, de aumento do ângulo de contato, é verificada com aumento da temperatura e pressão (BEKHTA e KRYSTOFIAK, 2016). Porém este comportamento não foi observado, o que denota que as características de heterogeneidade química e física da madeira podem influenciar no processo, especialmente quando analisada a molhabilidade da seção radial.

Na seção radial das peças, as quais não estiveram em contato direto com os pratos aquecidos da prensa, percebe-se um comportamento diferente do observado na seção tangencial (FIGURA 33).

FIGURA 33 - COMPORTAMENTO DO ÂNGULO DE CONTATO APARENTE PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DEPOSIÇÃO DA GOTÍCULA NA SUPERFÍCIE RADIAL DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

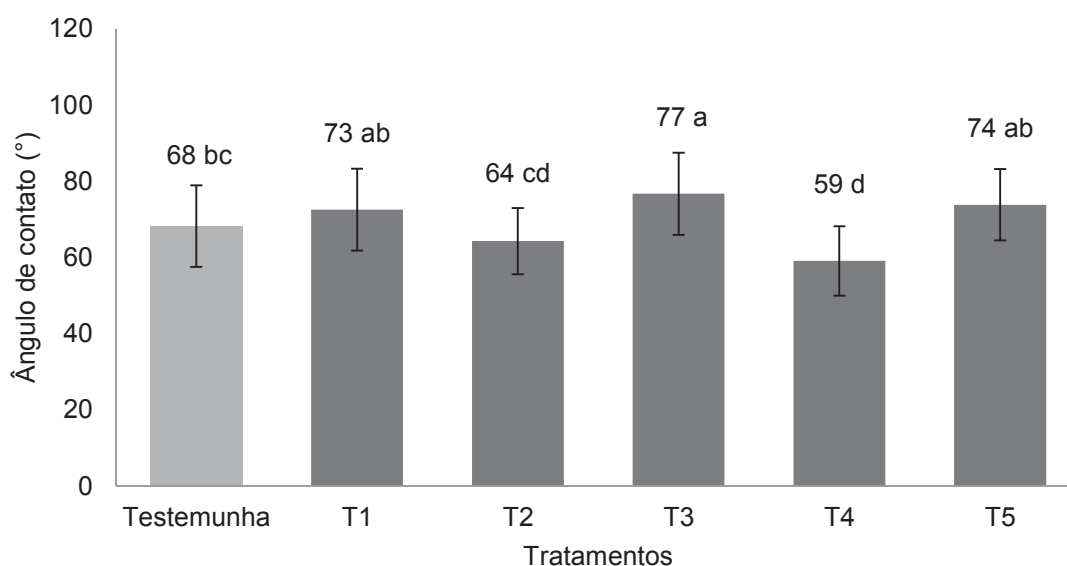
LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%.

A menor molhabilidade nesta seção da madeira foi do T3, seguido do T5 e T1, os quais não diferiram estatisticamente entre si. Já os tratamentos que apresentaram maior molhabilidade foram a testemunha seguido do T2 e T4. Nota-se

que os tratamentos com menor taxa de densificação (T1, T3 e T5) apresentam menor propensão à absorção ou espalhamento da água.

Os tratamentos com maior taxa de densificação (T2 e T4) apresentaram maior capacidade de absorção ou espalhamento da água, diferindo estatisticamente dos tratamentos com menor taxa de densificação (FIGURA 34).

FIGURA 34 - ÂNGULO DE CONTATO APARENTE MÉDIO DA SUPERFÍCIE RADIAL PARA A MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%.

O comportamento observado na seção radial e tangencial só foi semelhante para a testemunha. Para os demais tratamentos o ângulo de contato do sentido radial foi menor em relação à superfície tangencial.

Do ponto de vista prático, este comportamento possibilita a aplicação de peças densificadas na produção de artefatos colados lateralmente, pois não prejudica a colagem lateral da seção radial. Isto porque a superfície menos hidrofóbica favorece uma ligação mais intensa do adesivo com a madeira.

A redução da molhabilidade na superfície tangencial das peças densificadas deve-se ao contato das faces com os pratos aquecidos da prensa, o que ocasiona um fechamento e redução do lúmen das células minimizando a penetração da água na madeira. Além disso, a aplicação de temperatura faz com que haja a migração dos extrativos para a superfície da madeira, reorganização dos componentes

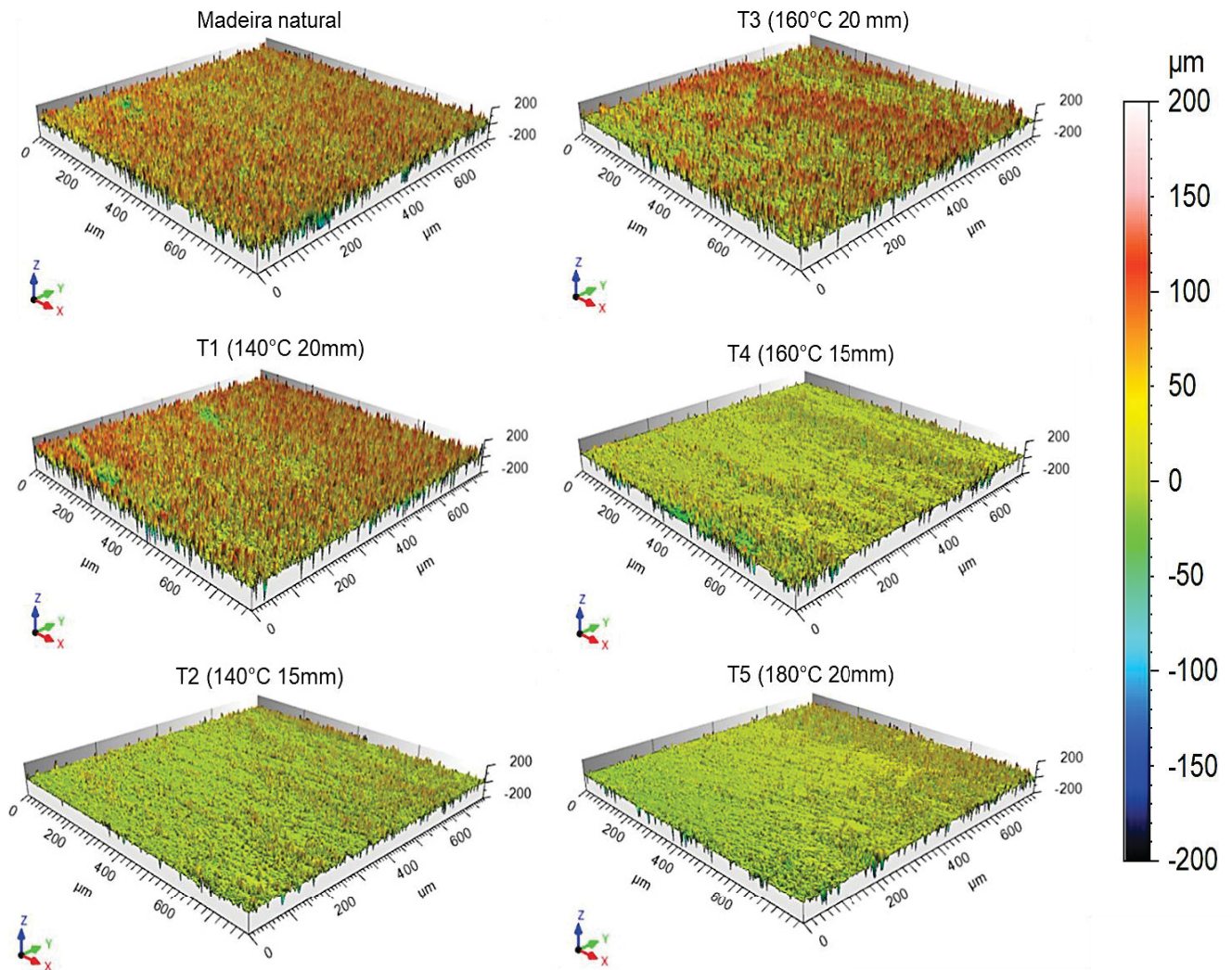


poliméricos lignocelulósicos e plasticização da lignina alterando as propriedades hidrofílicas da madeira (HAKKOU et al., 2005; METSÄ-KORTELAINEN e VIITANEN, 2012; SANTOS et al., 2012) e conseqüentemente diminui a molhabilidade.

### 3.4 EFEITO DA DENSIFICAÇÃO NA RUGOSIDADE DA MADEIRA

A aplicação dos processos de densificação alterou a rugosidade da superfície das amostras, observada visualmente pelas imagens topográficas representativas da madeira natural e dos tratamentos (FIGURA 35).

FIGURA 35 - IMAGENS TOPOGRÁFICAS REPRESENTATIVAS DA SUPERFÍCIE 3D DA MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: T1 = 140°C↓20%; T2 = 140°C↓40%; T3 = 160°C↓20%; T4 = 160°C↓40%; T5 = 180°C↓20%.

A alteração na topografia do material foi evidenciada em maior intensidade no T2, o qual apresentou redução significativa de todos os parâmetros avaliados em relação à testemunha, com decréscimo de 60% para a rugosidade média (Sa), 50,18% na quadrática média (Sq) e 30,98% de redução na rugosidade total (Sz), com simirialidade estatística somente ao T5 (TABELA 20).

TABELA 20 - PARÂMETROS DA RUGOSIDADE 3D SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS DE MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea* CONFORME A NORMA ISO-25178

Tratamento	Sa ( $\mu\text{m}$ )	Sq ( $\mu\text{m}$ )	Sz ( $\mu\text{m}$ )
Testemunha	7,25 (2,08) d	10,96 (2,67) d	116,18 (19,35) c
T1 (140°C↓20%)	5,72 (0,83) c	10,42 (1,01) d	148,54 (7,93) d
T2 (140°C↓40%)	2,90 (0,98) a	5,46 (1,47) a	80,18 (13,13) a
T3 (160°C↓20%)	5,47 (0,82) c	10,01 (1,04) cd	146,55 (11,18) d
T4 (160°C↓40%)	4,66 (1,09) bc	8,35 (1,77) bc	105,64 (16,43) bc
T5 (180°C↓20%)	3,83 (0,92) ab	6,89 (1,24) ab	91,81 (8,68) ab
Valor de F	19,37*	21,27*	52,79*

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Sa = rugosidade média; Sq = rugosidade quadrática média; Sz = rugosidade total, diferença entre o pico mais alto e o vale mais profundo. \* Significativo a 95% de nível de confiança; Valores médios seguidos por uma mesma letra não apresentam diferença estatística a 5% de probabilidade de erro. Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão.

Os valores da rugosidade média são semelhantes aos relatados na literatura, onde redução de 40% foi observada por Dilik e Hiziroglu (2012) e de até 85% em estudos de Ulker e Hirizoglu (2017) na temperatura de 180°C com pressão de 6,08 MPa.

As rugosidades médias obtida em pisos usinados de madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus* foram entre 2,34 $\mu\text{m}$  e 2,69 $\mu\text{m}$  com combinações de velocidade de avanço e velocidade de corte (SILVA et al., 2016). Já em estudo com lixamento e aplicação de seladora superficial em lâminas de curupixá (*Micropholis venulosa* Mart. Eichler), Raabe et al. (2017) relatam valores de rugosidade média entre 3,44 $\mu\text{m}$  e 9,96 $\mu\text{m}$ . Ambos os resultados citados são muito semelhantes com os obtidos no presente estudo, enfatizando que o processo utilizado permite obter minimização da rugosidade comparáveis aos de métodos já consolidados na indústria.

Para a rugosidade média (Sa), todos os tratamentos de densificação apresentaram valores inferiores à testemunha, com diferença significativa. Já para a rugosidade quadrática média, T1 e T3 não diferiram da madeira natural. E para a

rugosidade total, T1 e T3 apresentaram valores superiores à testemunha, ou seja, apresentaram maiores diferenças entre o pico mais alto e o vale mais profundo em relação à madeira sem o tratamento de densificação. Este fato não era esperado, pois se almejava com a aplicação do processo uma superfície mais regular.

Entretanto, isto pode ter ocorrido devido à diferença do tamanho e distribuição dos poros da madeira que pode alterar a textura superficial. Esta ocorrência justificase através da análise da TABELA 21, onde a testemunha apresenta os parâmetros de rugosidade (SpK, Sk e SvK) superior ou igual estatisticamente às madeiras densificadas.

Tais parâmetros são baseados na curva *Abbott*, técnica de filtragem utilizada para discernir as irregularidades naturais do material, como a parte anatômica da rugosidade intrínseca dos tratamentos aplicados (GURAU 2004; SANDAK e NEGRI, 2005). Ou seja, quando se elimina o fator inerente às características da madeira como as estruturas anatômicas, especialmente os vasos, responsáveis por vales profundos a partir da superfície (CADEMARTORI et al., 2017).

Nota-se que os tratamentos alteraram positivamente os parâmetros de rugosidade, com valores médios inferiores à madeira natural, destacando T2 (140°C↓40%) e T5 (180°C↓20%), com diferenças significativas em relação à madeira natural (TABELA 21).

TABELA 21 - PARÂMETROS DA RUGOSIDADE 3D SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS DE MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea* CONFORME A NORMA EUR-15178N

Tratamento	SpK (µm)	SK (µm)	SvK (µm)
Testemunha	18,03 (3,82) d	12,29 (5,06) c	19,60 (4,38) c
T1 (140°C↓20%)	17,06 (2,04) cd	5,52 (2,38) b	19,53 (2,59) c
T2 (140°C↓40%)	8,92 (2,53) a	1,88 (1,33) a	10,70 (3,38) a
T3 (160°C↓20%)	16,52 (1,98) cd	5,03 (2,40) ab	18,58 (2,52) c
T4 (160°C↓40%)	14,04 (3,58) bc	3,27 (1,53) ab	16,51 (4,36) bc
T5 (180°C↓20%)	11,40 (1,99) ab	2,98 (1,93) ab	13,60 (3,41) ab
Valor de F	20,08 *	22,48*	12,62*

FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Spk (altura reduzida do pico), Sk (profundidade da rugosidade do núcleo) e SvK (profundidade reduzida do vale). \* Significativo a 95% de nível de confiança; Valores médios seguidos por uma mesma letra não apresentam diferença estatística a 5% de probabilidade de erro. Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão.

Através desta análise infere-se que o processo de densificação termomecânica permite reduzir os indicadores de rugosidade superficial de madeiras

em geral, possibilitando sua aplicação onde se almejam reduções de tais parâmetros.

A menor rugosidade da superfície favorece a menor molhabilidade da superfície do material. Nas imagens 3D nota-se que T2 (140°C↓40%) e T5 (180°C↓20%) destacam-se por apresentar uma superfície mais lisa, resultando em um aspecto estético mais apreciável para aplicações industriais, como por exemplo, uso da madeira sem acabamentos ou para aplicação revestimentos, tintas e vernizes, onde superfícies mais lisas apresentam menor consumo para cobertura (SANDAK e NEGRI, 2005; BEKHTA et al., 2014a).

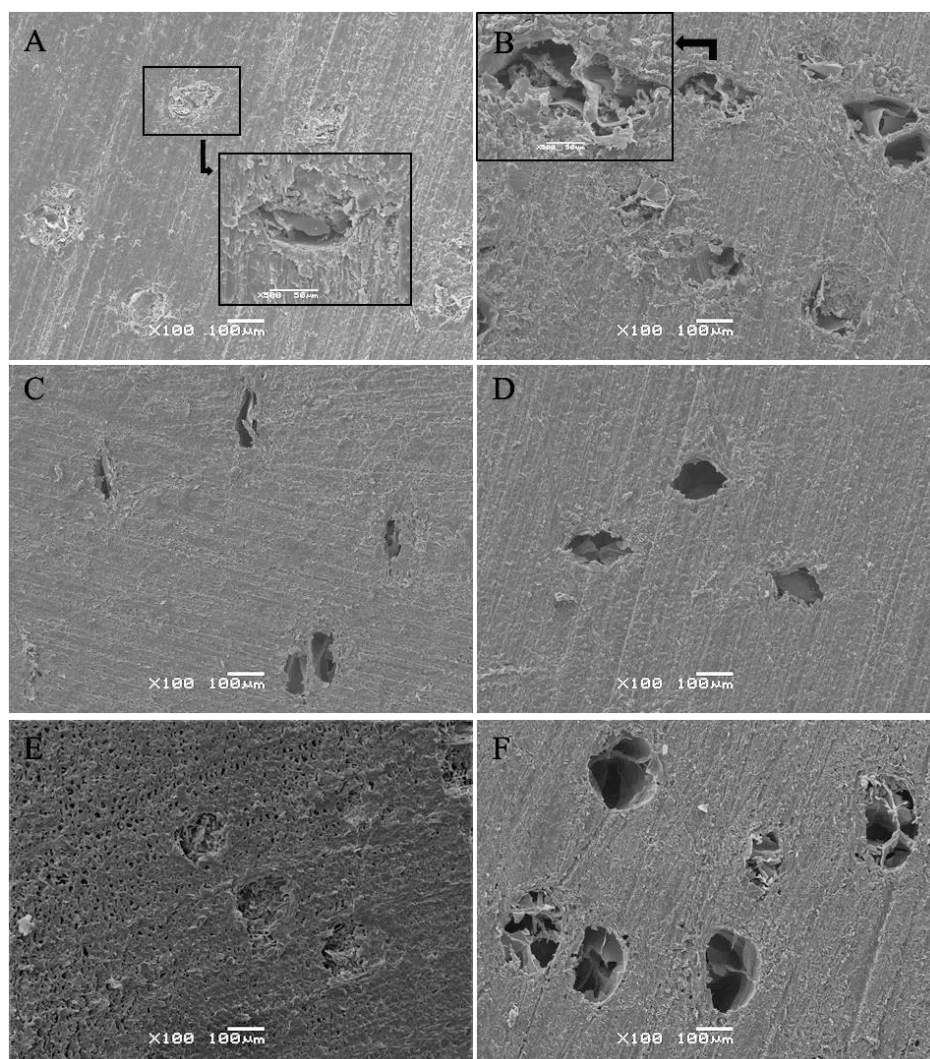
A um mesmo nível de temperatura os efeitos nos parâmetros de rugosidade são mais acentuados nas amostras com compactação de 40% em espessura (15mm). Ou seja, o efeito da compressão favoreceu a minimização dos parâmetros de rugosidade. Vale ressaltar que não há uma sequência lógica relacionada entre temperatura e compactação que interfira na rugosidade, haja vista que os tratamentos que apresentaram os melhores resultados foram com temperatura a 140°C e compactação 40% em espessura e 180°C com compactação de 20%.

Entretanto, analisando do ponto de vista industrial e econômico é preferível aplicar o tratamento com menor temperatura, pois há menor dispêndio energético, não sendo necessário utilizar temperaturas acima de 140°C para obter redução dos parâmetros de rugosidade.

### 3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A FIGURA 36 ilustra as faces transversais das amostras densificadas e da madeira natural. É possível observar deformações no formato dos vasos das amostras densificadas, passando de um formato ovalado na testemunha para uma forma achatada com a aplicação dos tratamentos, reduzindo o volume dos poros.

FIGURA 36 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DA FACE TRANSVERSAL DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

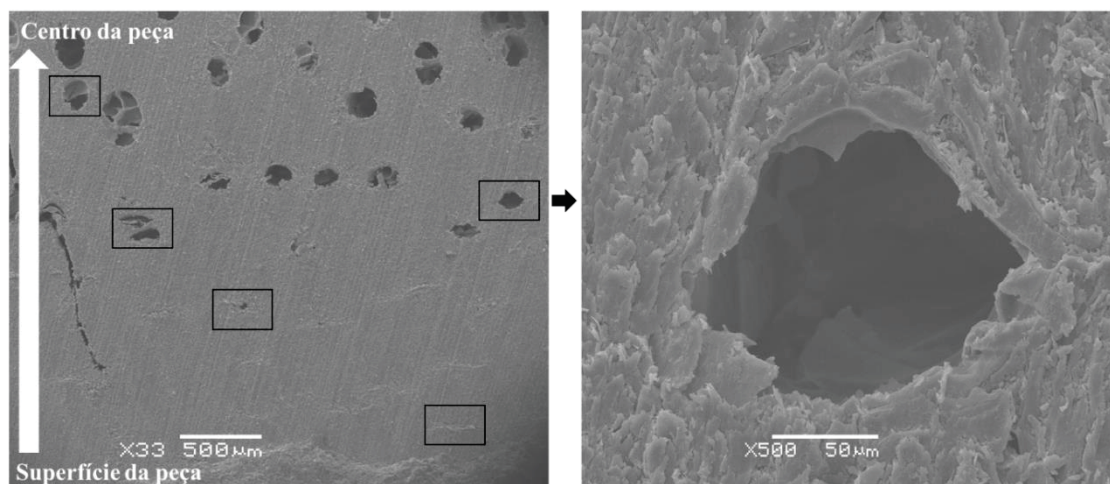


FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A (T1 = 140°C↓20%); B (T2 = 140°C↓40%); C (T3 = 160°C↓20%); D (T4 = 160°C↓40%); E (T5 = 180°C↓20%); F (Testemunha).

Na morfologia transversal das amostras densificadas pode-se perceber a formação de um perfil de alteração do formato dos vasos da madeira. Próximo à superfície das peças apresenta forma achatada, praticamente com o vaso fechado próximo à superfície das peças, passando a uma estrutura arredondada próximo ao centro da peça, semelhante ao formato original dos poros da madeira (FIGURA 37). Tal fato indica uma compactação mais expressiva nas seções próximas à superfície, reduzindo a porosidade.

FIGURA 37 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DA FACE TRANSVERSAL ILUSTRANDO O PERFIL DE ALTERAÇÃO NOS VASOS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Quadro preto indica as deformações ocorridas nos vasos.

Alguns vasos apresentaram colapsos e partes das superfícies estavam satisfatoriamente plastificadas e comprimidas, não sendo verificado rompimento da parede celular dos vasos. Sadatnezhad et al., (2017) com um processo de densificação em escala industrial observou comportamento semelhante para madeira de álamo, com uma camada densificada abaixo da superfície, entretanto os autores verificaram colapso dos vasos durante a compressão.

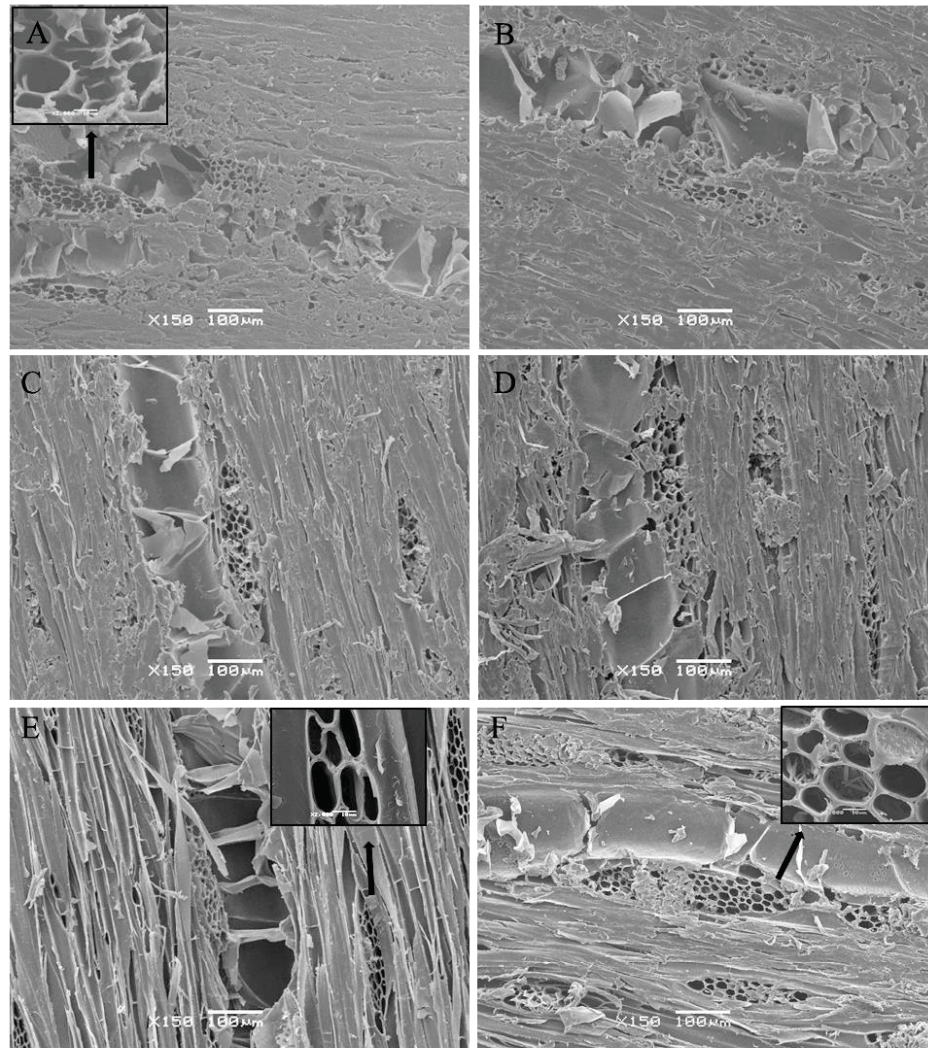
Na FIGURA 38 podem ser observadas imagens da face tangencial da madeira de *Gmelina arborea* densificada e da estrutura natural da madeira. Nitidamente na imagem da madeira natural, observa-se a distinção entre raio, vaso e fibras. Já nas amostras densificadas, pode-se distinguir estas estruturas, porém percebe-se um esmagamento de tais elementos, dando um aspecto de superfície menos rugosa em relação à madeira natural. Tal observação corrobora com o comportamento previamente ressaltado na avaliação da rugosidade superficial.

Para o T5 (180°C↓20%) o aspecto de esmagamento não é tão visível, porém nota-se em detalhe (FIGURA 38–E) um desfibramento do tecido fibroso. Este fato foi observado no tratamento com maior temperatura, o que pode estar associado à degradação das hemiceluloses que envolvem as fibrilas, acarretando no desmembramento das mesmas.

Quanto às células de raio, nota-se que na madeira natural não há alteração da parede celular, diferentemente do observado nas amostras densificadas.

Observa-se um rompimento da parede celular associada a um achatamento superficial, como verificado em detalhe na FIGURA 38-A.

FIGURA 38 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DA FACE TANGENCIAL DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

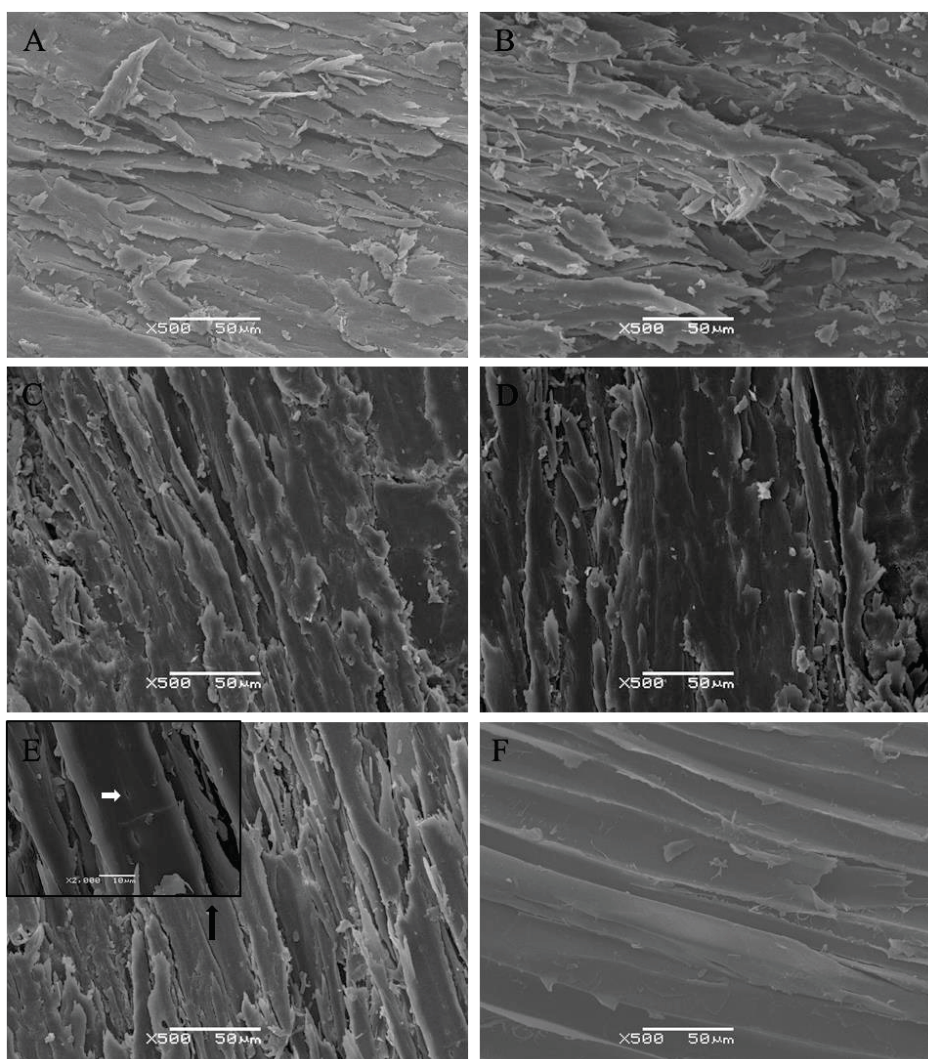


FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A (T1 = 140°C↓20%); B (T2 = 140°C↓40%); C (T3 = 160°C↓20%); D (T4 = 160°C↓40%); E (T5 = 180°C↓20%); F (Testemunha).

Assim como na seção tangencial, pode-se perceber a alteração das fibras na face radial (FIGURA 39). Nas amostras da testemunha as fibras apresentam formato definido, com distribuição paralelamente umas às outras ao longo da madeira, apresentando um corte ao meio axialmente, devido à ação do aplainamento da madeira. Apesar disso, percebe-se a estrutura bem definida e nítida, permitindo a visualização da seção interna da fibra.

FIGURA 39 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DA FACE RADIAL DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A (T1 = 140°C↓20%); B (T2 = 140°C↓40%); C (T3 = 160°C↓20%); D (T4 = 160°C↓40%); E (T5 = 180°C↓20%); F (Testemunha). \*Em destaque alterações nas pontoações.

Já nas madeiras densificadas, a estrutura apresenta formato irregular semelhante a um esmagamento fibrilar, dificultando a distinção estrutural. É detalhada na FIGURA 39-E a alteração das pontoações no T5 (180°C↓20%), com um formato alongado e com a presença de fissuras em suas extremidades o que reduz as propriedades mecânicas da madeira deste tratamento em relação aos demais. Esta alteração é devido à temperatura elevada aplicada, o que limita a aplicação deste processo com temperatura de 180°C ou acima desta.



#### 4 . CONCLUSÕES

A densificação termomecânica atribui uma coloração mais escura a madeira.

A densificação com menor temperatura (140°C) e compactação de 40% da espessura (T2), promove menor alteração de cor.

A densificação degradou superficialmente as hemiceluloses, reduziu a molhabilidade da face tangencial e os parâmetros de rugosidade.

Alterações dos elementos anatômicos foram observadas na morfologia superficial das amostras densificadas, enquadrando-se como uma técnica para melhorar a qualidade superficial da madeira.

A densificação pode ser compreendida como fonte de um produto alternativo de mercado, oferecendo uma madeira de média densidade, menor molhabilidade e superfície menos rugosa em comparação à madeira natural de *Gmelina arborea*.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A espécie *Gmelina arborea* apresenta bom potencial de uso de sua madeira, pois resultados quanto ao rendimento em madeira serrada e secagem ao ar livre mostraram-se promissores. Entretanto, a partir de sua caracterização, infere-se que algumas aplicações da madeira devem ser evitadas, especialmente em casos que necessite alta resistência e dureza.

Por outro lado, a técnica de densificação termomecânica permite obter aumento significativo da propriedade densidade, assim como aumento de suas propriedades mecânicas e redução do teor de umidade de equilíbrio. Com isso, ampliam-se as opções de uso da madeira em relação ao seu estado natural.

Do mesmo modo, a técnica de densificação é eficiente para modificar as propriedades superficiais da madeira, como alteração de cor, redução da molhabilidade e rugosidade superficial. Destaca-se a utilização da técnica de densificação termomecânica para redução dos parâmetros de rugosidade de madeiras em geral, pois eliminando-se as características intrínsecas da madeira observou-se que o uso da densificação reduz consideravelmente os parâmetros da rugosidade superficial. Tais alterações são associadas às modificações superficiais e observadas nas microestruturas da madeira.

## **RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Diante do exposto e resultados observados no presente estudo indica-se expor os materiais a ação de organismos xilófagos e campo de apodrecimento, analisando seu comportamento. A análise do comportamento da colagem lateral de amostras densificadas e seu comportamento mecânico devem ser realizadas.

Ademais, recomendam-se estudos com densificações superficiais em madeiras de baixa densidade, alborno e lenho juvenil, com altas temperaturas e pressões com tempos reduzidos, observando as alterações na matéria-prima, bem como análise de custos de processos produtivos em larga escala.

## REFERÊNCIAS

- ADEKUNLE, V.A.J.; ALO, A.A.; ADEKAYODE, F.O. Yields and nutrient pools in soils cultivated with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* in Nigerian rainforest ecosystem. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.10, n.2, p.127-135, 2011. DOI: 10.1016/j.jssas.2011.05.001
- AJUONG, E.; PINION, L.C.; MOHAMMAD, S.H.B. Degradation of Wood. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. **Shreir's Corrosion**, v.3, p.2439-2446, 2010. DOI: 10.1016/B978-044452787-5.00118-9
- ALTGEN, M.; ADAMOPOULOS, S.; MILITZ, H. Wood defects during industrial-scale production of thermally modified Norway spruce and Scots pine. **Wood Material Science and Engineering**, v.12, n.1, p. 14-23, 2015. DOI: 10.1080/17480272.2014.988750
- ALVES, C.; PEREIRA, K.R.M.; SILVA, T.T.S.; FROTA, V.B.; SOUZA, I.A.T. Avaliação das propriedades físicas de oito espécies usadas em serrarias de Rio Branco, Acre. In: **Anais do 4º Congresso Florestal Paranaense** [online]. 2012; Curitiba.
- ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, E.; BALLESTEROS, M.; NEGRO, M. J. Pre treatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. **Bioresource Technology**, v.101, n.13, p.4851–4861, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. Pennsylvania, 31 p., 2014.
- ANSELL, MP. Wood microstructure – A cellular composite. **Wood Composites**. p.3-26. 2015.
- ARRUDA, L. M. **Modificação termomecânica da madeira de amescla (*trattinnickia burseraefolia* (mart.) willd.): efeito sobre as propriedades de lâminas e compensados**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, 2012.
- ARRUDA, L.M.; DEL MENEZZI, C.H.S. Effect of thermomechanical treatment on physical properties of wood veneers. **International Wood Products Journal**, v.4, n.4, p.217-224, 2013. DOI: 10.1179/2042645312Y.0000000022
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. ABCP M14/70. **Densidade básica da madeira**. 1970.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE PISOS DE MADEIRA MACIÇA – ANPM. **Madeiras para piso**. Disponível em: <<http://www.anpm.org.br/?S=17&L=1>>. Acesso em 14 jan. 2018.
- ATIK, C.; CANDAN, Z.; UNSAL, O.; Colour characteristics of pine wood affected by thermal compressing. **Ciência Florestal**, v.23, n.2, p.475-479, 2013. DOI: 10.5902/198050989291
- AYADI, N.; LEJEUNE, N.; CHARRIER, F.; CHARRIER, B.; MERLIN, A. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.61, n.3, p.221-226, 2003. DOI: 10.1007/s00107-003-0389-2

AZEES, M.A.; ANDREW, J.E.; SITHOLE, B.B. A preliminary investigation of nigerian *Gmelina arborea* and *Bambusa vulgaris* for pulp and paper production. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v.18, n.1, 2016. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000007

BAAR, J.; PASCHOVÁ, Z.; ČERMÁK, P.; WIMMER, R. Color changes of various wood species in response to moisture. **Wood and Fiber Science**, v.51, n.2, p. 119-131, 2019. DOI: 10.22382/wfs-2019-014

BAJPAI, P. **Biermann's Handbook of Pulp and Paper (Third Edition)**. Chapter 5- Hardwood Anatomy. Volume 1: Raw Material and Pulp Making. p.153-208, 2018. DOI: 10.1016/B978-0-12-814240-0.00005-7

BAKAR, B.F.A.; HIZIROGLU, S.; TAHIR, P.M. Properties of some thermally modified wood species. **Materials & Design**, v.43, p.348-355, 2013. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.054

BAO, M., HUANG, X., JIANG, M., LI, N., YU, Y., YU, W. Study on the changes in surface characteristics of *Populus tomentosa* due to thermo-hydro-process. **Journal of Wood Science**, v.64, n.3, 2018. DOI:10.1007/s10086-018-1697-9

BARMPOUTIS, P.; DIMITROPOULOS, K.; BARBOUTIS, I.; GRAMMALIDIS, N.; LEFAKIS P. Wood species recognition through multidimensional texture analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.144, p.241-248, 2018. DOI: 10.1016/j.compag.2017.12.011

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

BATISTA, D.C.; KLITZKE, J.R.; SANTOS, C.V.T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n.4, p.665-674, 2010.

BAYSAL, E.; KART, S.; TOKER, H.; DEGIRMENTEPE, S. Some physical characteristics of thermally modified oriental- beech wood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v.16, n.3, p.291-298, 2014. DOI:10.4067/S0718-221X2014005000022

BEKHTA P, KRYSOFIAK T, PROSZYK S, LIS B. Surface gloss of lacquered medium density fibreboard panels veneered with thermally compressed birch wood. **Progress in Organic Coatings**, v.117, p.10-19, 2018. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.12.020

BEKHTA, P.; KRYSOFIAK, T. The influence of short-term thermo-mechanical densification on the surface wettability of wood veneers. **Maderas, Ciencia y tecnología**, Concepción, v.18, n.1, p.79-90, 2016. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000008.

BEKHTA, P.; MAMOŇOVÁ, M.; SEDLIAČIK, J.; NOVAK, I. Anatomical study of short-term thermo-mechanically densified alder wood veneer with low moisture content. **European Journal of Wood and Wood Products**. v.74, n.5, p.643 – 652, 2016. DOI: 10.1007/s00107-016-1033-2

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce. **Holzforschung**, v.57, p.539-546, 2003.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P.; SEDLIACIK, J. Effect of pre-pressing of veneer on the glueability and properties of veneer-based products. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v.70, n.1-3, p.99–106, 2012. DOI: 10.1007/s00107-010-0486-y

BEKHTA, P.; PROSZYK, S.; KRYSZTOFIK, T.; MAMONOVA, M.; PINKOWSKI, G.; LIS, B. Effect of thermomechanical densification on surface roughness of wood veneers. **Wood Material Science & Engineering**, v.9, n.3, p.233–245, 2014a. DOI: 10.1080/17480272.2014.923042

BEKHTA, P.; PROSZYK, S.; KRYSZTOFIK. Colour in short-term thermo-mechanically densified veneer of various wood species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.72, n.6, p.785, 2014b. DOI: 10.1007/s00107-014-0837-1

BEKHTA, P.A.; HIZIROGLU, S.; SHEPELYUK, O.O. Properties of plywood manufactured from compressed veneer as building material. **Materials & Design**, v.30, n.4, p.947–953, 2009. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.001

BENIN, C.C.; WATZLAWICK, L.F.; HILLIG, E. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.27, n.4, p.1375-1384, 2017. DOI: 10.5902/1980509830219

BIGAN, M.; MUTEL, B. Cold remote plasma modification of wood: Optimization process using experimental design. **Applied Surface Science**. v.453, p.423-435, 2018. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.252

BLOMBERG, J.; PERSSON, B.; BEXELL, U. Effects of semi-isostatic densification on anatomy and cell-shape recovery on soaking. **Holzforschung**, v.60, n.3. p.322–331, 2006. DOI: 10.1515/HF.2006.052

BONATO JR, A.I.; ROCHA, M.P. da; JUÍZO, C.G.F.; KLITZKE, R.J. Efeito do Sistema de Desdobro e das Classes Diamétricas no Rendimento em Madeira Serrada de *Araucaria angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.24, 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.100414

BOONSTRA, M.J.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA, B.F.; KEGEL, E.V. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of Forest Science**, v 64, n.7, 2007. DOI: 10.1051/forest:2007048

BOONSTRA, M. **A two-stage thermal modification of wood**. Ph.D. Thesis in Applied Biological Sciences: Soil and Forest management. Henry Poincaré University-Nancy, France, 2008.

BORST K de. JENKEL C, MONTERO C, COLMARS J, GRIL J, KALISKE M, EBERHARDSTEINER J. Mechanical characterization of wood: An integrative approach ranging from nanoscale to structure. **Computers & Structures**, v.127, p.53-67, 2013.

BORST, K. de; BADER, T.K.; Structure–function relationships in hardwood – Insight from micromechanical modelling. **Journal of Theoretical Biology**, v.345, p.78-91, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2013.12.013>

BRAZ, R.L.; DUARTE, A.P.C.; OLIVEIRA, J.T.S.; MOTTA, J.P.; ROSADO, A.M. Curva Característica de Secagem da Madeira de *Tectona grandis* e *Acacia mangium* ao Ar Livre. **Floresta e Ambiente**; v.22, n.1, p.117-123, 2015. DOI: 10.1590/2179-8087.037913

BRUN, E.J.; BERSCH, A.L.; PEREIRA, F.A.; SILVA, D.A.; BARBA, Y.R.; JUNIOR, J.R.C. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **FLORESTA**, v.48, n.1, p.87-92, 2018. DOI: 10.5380/rev.v48i1.51673

BUDAKÇI, M.; SÖNMEZ, A.; PELIT, H. The color changing effect of the moisture content of wood materials on water borne varnishes. **BioResources**, v.7, n.4, p:5448-5459, 2012. DOI: 10.15376/biores.7.4.5448-5459

BUDAKÇI, M.; ILÇE, A.C.; GÜRLEYEN, T.; UTAR, M. Determination of the surface roughness of heat-treated wood materials planed by the cutters of a horizontal milling machine. **BioResources**, v.8, n.3, p.3189-3199, 2013. DOI: 10.15376/biores.8.3.3189-3199.

CADEMARTORI, P.H.G.de; STAFFORD, L.; BLANCHET, P.; MAGALHÃES, W.L.E.; MUNIZ, G.I.B. de. Enhancing the water repellency of wood surfaces by atmospheric pressure cold plasma deposition of fluorocarbon film. **RSC Advances**, v.7, p.29159-29169, 2017. DOI: 10.1039/C7RA03334F

CADEMARTORI, P.H.G.de; MATTOS, B.D.; MISSIO, A.L.; GATTO, D.A. Colour responses of two fast-growing hardwoods to two-step steam-heat treatments. **Materials Research**, v.17, n.2, p.487-493, 2014a. DOI: 10.1590/S1516-14392014005000031

CADEMARTORI, P.H.G.de; MISSIO, A.L.; MATTOS, B.D.; SCHNEID, E.; GATTO, D.A. Physical and mechanical properties and colour changes of fast-growing Gympie messmate wood subjected to two-step steam-heat treatments. **Wood Material Science & Engineering**, v.9, n.1, p.40-48, 2014b. DOI: 10.1080/17480272.2013.853692

CADEMARTORI, P.H.G.; SANTOS, P.S.B. DOS; SERRANO, L.; LABIDI, J.; GATTO, D.A. Effect of thermal treatment on physicochemical properties of Gympie messmate wood. **Industrial Crops and Products**, v.45, p.360-366, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.12.048

CAHYONO, T.D.; WAHYUDI, I.; PRIADI, T.; FEBRIANTO, F.; DARMAWAN, W.; BAHTIAR, E.T.; OHORELLA, S.; NOVRIYANTI, E. The quality of 8 and 10 years old samama wood (*Anthocephalus macrophyllus*). **Journal of the Indian Academy of Wood Science**. v. 12, n.1, p.22–28, 2015. DOI: 10.1007/s13196-015-0140-8

CAI, J.B; DING, T.; YANG, L. Dimensional stability of poplar wood after densification combined with heat treatment. **Applied Mechanics and Materials**, v.152-154, p.112-116, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.152-154.112

CALVO-ALVARADO, J.C.; ARIAS, D.; RICHTER, D.D. Early growth performance of native and introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v.242, n.2–3, p.227-235, 2007.

CANDAN, Z.; KORKUT, S.; UNSAL, O. Effect of thermal modification by hot pressing on performance properties of paulownia wood boards. **Industrial Crops and Products**, v.45, p.461-464, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.12.024

CARDOSO, C.C.; MOUTINHO, V.H.P.; MELO, L.O.; SOUSA, L.K.V.S.; SOUZA, M.R. Caracterização físico-mecânica de madeiras amazônicas com aptidão tecnológica para comercialização. **Revista de Ciências Agrárias**, v.55, n.3, p.176-183, 2012. DOI: 10x4322:ocax2012x053

CARREIRA, M.R.; SEGUNDINHO, P.G.A.; DIAS, A.A. Determination of the e/g ratio of wood logs using transverse vibration. **Wood Research**, v.57, p.207-220, 2012.

CARVALHO, A.G.; ZANUNCIO, A.J.V.; SILVA, C.M.S.; CARNEIRO, A.C.O.; PAULA OLIVEIRA, M. Método de ressonância para predição das propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Pinus oocarpa* termorretrificadas. **Revista Matéria**, v.22, n.1, 2017

CARVALHO, D.E.; JUIZO, C.G.F.; FRANÇA, M.C.; LOIOLA, P.L.; ROCHA, M.P. da. Effect of thermal modification in the natural resistance of *Eucalyptus grandis* and *Pinus taeda* woods. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n.1, 2019a. DOI: 10.5039/agraria.v14i1a5606.

CARVALHO, D.E.; ROCHA, M.P.da; KLITZKE, R.J.; CADEMARTORI, P.H.G.de. Eficiência operacional da serra de fita no desdobro de eucalipto. **TECNO-LÓGICA**, Santa Cruz do Sul, v.23, n.1, p.36-41, 2019b. DOI: 10.17058/tecnologia.v23i1.12571

CARVALHO, D.E.; ROCHA, M.P.da; TIMOFEICZYK JR, R.; KLITZKE, R.J.; Rendimento e variedade de produtos no desdobro de toras de *Eucalyptus* spp. **TECNO-LÓGICA**, Santa Cruz do Sul, v.23, n.1, p.08-13, 2019c. DOI: 10.17058/tecnologia.v23i1.12215

CASTRO. N.S.; FOELKEL, C.E.B.; GOMIDE, J.L. Aproveitamento industrial da madeira de *Gmelina arborea* Roxb. para a produção de celulose. **Revista Árvore**, v.3, n.1, 1979.

CERRADA, G.C.; LACRUZ, Y.N.Z.; CUAURO, E.C.; MORENO, J.R.B.; VALLERO, S.W. Physical properties of wood of 25 years old *Gmelina arborea* species, from plantations in the Ticoporo Forest Reserve, Barinas State, Venezuela. **Revista Forestal Venezolana**, v.55, n.2, p.193-201, 2011.

CHIMELO, J. Anatomia e propriedades gerais da madeira. In. OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C. NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda.. 2007. p. 107- 124.

CHRISTIANSEN, A.W. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: a critical review of the literature. Part I. physical responses. **Wood and Fiber Science**, v.22, n.4, p.441-459, 1990.

COBAS, A.C.; AREA, M.C.; MONTEOLIVA, S. Transición de madera juvenil a madura en un clon de *Populus deltoides* implantado en Buenos Aires Argentina. **Maderas, Ciencia y Tecnología**. v.15, n.2, p.223-234 ,2013.

COELHO, M.U.; DEL MENEZZI, C.H.S.; SOUZA, M.R. Abrasion resistance of pinus wood subjected to thermomechanical treatments. **PRO LIGNO**, v.13, n.4, p.94-100, 2017.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. COPANT 461: **Maderas**: método de determinación del peso específico aparente. Caracas, 1972.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. COPANT 462: **Maderas**: método de determinación de la contracción. Caracas, 1972.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. COPANT 464: **Maderas**: método de determinación de la compresión axial o paralela al grano. Caracas, 1972.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. COPANT 465: **Maderas**: método de determinación de la dureza. Caracas, 1972.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. COPANT 555: **Maderas**: método de ensayo de flexión estática. Caracas, 1973.

CORADIN, V.; MUNIZ, G.I.B. **Normas e procedimentos em estudos de anatomia da madeira**: Angiospermae II-Gimnospermae. Série Técnica 15. IBAMA. Brasília. 1992.

COSTA, M.A.; DEL MENEZZI, C.H.S. Efeito do tratamento termomecânico nas propriedades do contraplacado de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke). **Revista Árvore**, v.41, n.1, 2017. DOI: 10.1590/1806-90882017000100015

COSTA, M.L. **Efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades de compensados e painéis de lâminas paralelas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke)**. 148p. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Florestal, 2015.

CUNHA, A.B.; FRANÇA, M.C.; ALMEIDA, C.C.F.; GORSKI, L.; CRUZ, R.C.; SANTOS, D. Avaliação do rendimento em madeira serrada de *Eucalyptus benthamii* e de *Eucalyptus grandis* por meio do desdobro tangencial e radial. **Floresta**, v.45, n.2, p.241-250, 2015b. DOI: 10.5380/ufv.v45i2.32570

CUNHA, A.B. da; BRAND, M.A.; SIMÃO, R.L.; MARTINS, A.S.; ANJOS, E.A.M. dos; SURDI, P.G.; SHIMALSKI, M.B. Determinação do rendimento de matéria-prima de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage por meio de diferentes métodos de desdobro. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.4, p.733-741, 2015a. DOI: 10.1590/0100-67622015000400016

DALTIN, D. **Tensoativos**: química, propriedades e aplicações. Blucher, São Paulo, 2011.

DAMMSTRÖM, S.; SALMÉN, L.; GATENHOLM, P. On the interactions between cellulose and xylan, a biomimetic simulation of the hardwood cell wall. **Bioresources**, v.4, n.1, p.3-14, 2009.

DHAKULKAR, S.; GANAPATHI, T.R.; BHARGAVA, S.; BAPAT, V.A. Induction of hairy roots in *Gmelina arborea* Roxb. and production of verbascoside in hairy roots. *Plant Sci*, v.169, n. 5, p. 812-818, 2005. DOI:10.1016/j.plantsci.2005.05.014

DEL MENEZZI, C.H.S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy Exploration & Exploitation**, v.20, n.1, p.105-111, 2009.

DIAS, A.C.C.; MARCHESAN, R.; PIERONI, G.B.; ALMEIDA, V.C.; VIEIRA, R.S.; MORAES, C.B. de. Qualidade da madeira para produção de lâminas de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Floresta**, Curitiba, PR, v.47, n.3, p.333 - 341, 2017. DOI: 10.5380/ufv.v47i1.50732

DILIK, T.; HIZIROGLU, S. Bonding strength of heat treated compressed Eastern redcedar wood. **Materials & Design**, v.42, p.317–320, 2012. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.05.050



- DING, W.; KOUBAA, A.; CHAALA, A. Mechanical properties of MMA-hardened hybrid poplar wood. **Industrial Crops and Products**, v.46, p.304-310. 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.02.004
- DINWOODIE, J.M. **Timber: its nature and behaviour**. E & FN Spon, London. 2000.
- DIOUF, P.N.; STEVANOVIC, T.; CLOUTIER, A.; FANG, C-H.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A.; MARIOTTI, N. Effects of thermo-hygro-mechanical densification on the surface characteristics of trembling aspen and hybrid poplar wood veneers. **Applied Surface Science**, v.257, n.8, p.3558–3564, 2011. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.074
- DOGU, D.; TIRAK, K.; CANDAN, Z.; UNSAL, O. Anatomical investigation of thermally compressed wood panels. **BioResources**, v.5, n.4, p.2640–2663, 2010. DOI: 10.15376/biores.5.4.2640-2663
- DONALDSON, L.; NANAYAKKARA, B.; HARRINGTON, J. Wood Growth and Development. **Encyclopedia of Applied Plant Sciences** (Second Edition), v.1, p.203-210, 2017. DOI: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00114-3
- DONALDSON, L.A. Microfibril angle: measurement, variation and relationships. **IAWA JOURNAL**, v.29, p.345–386, 2008.
- DUPUY, D.; MILLE, G. **Timber plantations in the humid tropics of Africa**. FAO Forestry paper 98. Rome: FAO, 1993.
- DVORAK, W.S. World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. **New Forests**, v.28, n.2-3, p.111-126. 2004.
- EATON, R.A.; HALE, M.D.C. **Wood: decay, pests and protection**. Londres: Chapman & Hall, 116p., 1993,
- EBY, W.M.; OYAMAKIN, S.O.; CHUKWU, A.U. A new nonlinear model applied to the height-DBH relationship in *Gmelina arborea*. **Forest Ecology and Management**, v. 397, n. 1, p: 139-149. 2017.
- ELOY, E.; SILVA, D. A.; CARON, B. O.; SOUZA, V. Q.; BEHLING A.; ELLI, E. F.; MONTEIRO, G. C. Caracterização da biomassa da madeira e da casca de *Mimosa scabrella* Benth cultivada em dois diferentes espaçamentos. **Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v.6, n.1, p.38-46, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n1p38-46
- ESPINOZA, J.A. Within-tree density gradients in *Gmelina arborea* in Venezuela. **New Forests**, v.28, n.2, p.309-317, 2004. DOI: 10.1023/B:NEFO.0000040959.42533.e7
- ESPITIA, M.; MURILLO. O.; CASTILLO, C.; Ganancia genética esperada en melina (*Gmelina arborea* roxb.) en Córdoba (Colombia). **Revista Árvore**, Viçosa, v.40, n.1, p.71-80, 2016.
- ESTEVEES, B.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Improvement of technological quality of eucalypt wood by heat treatment in air at 170-200°C. **Forest Products Journal**, v.57, n.1-2, p.47-52, 2007.
- ESTEVEES, B.; PEREIRA, H. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, v.4, n.1, p.370-404, 2009.
- ESTEVEES, B.; RIBEIRO, F.; CRUZ-LOPES, L.; DOMINGOS, J.F.I. Densification and heat treatment of maritime pine wood. **Wood research**, v.62, n.3, p.373-388, 2017.

EUR 15178N. **The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions**, Stout, Sullivan, Dong, Mainsah, Luo, Mathia, Zahouani, Commission of the European Communities, EUR 15178 EM, 1993.

EVANGELISTA, W.V.; SILVA, J.C.; DELLA LUCIA, R.M.; LOBO, L.M.; SOUZA, M.O. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake no sentido radial e longitudinal. **Ciência da Madeira**, v.1, n.2, p.1-19, 2010. DOI: 10.12953/2177-6830.v01n02a01

EVERT, R.F. **Esau's plant anatomy: meristems, cells and tissues of the plant body their structure, function, and development**. 3 ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 601p., 2006.

FAGGIANO, B.; MARZO, A. A method for the determination of the timber density through the statistical assessment of ND transverse measurements aimed at in situ mechanical identification of existing timber structures. **Construction and Building Material**, v.101, p.1235-1240, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.088

FANG C.; BLANCHET, P.; CLOUTIER, A.; BARBUTA, C. Engineered wood flooring with densified surface layer for heavy-duty use. **BioResources**, v.7, n.4, p.5843-5854, 2012a.

FANG, C.H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A.; MARIOTTI, N. Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part I: Dimensional stability, **BioResources**, v.6, n.1, p.373–385, 2011.

FANG, C.H.; MARIOTTI, N.; CLOUTIER, A.; KOUBAA, A.; BLANCHET, P. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v.70, n.1–3, p.155–163, 2012b. DOI: 10.1007/s00107-011-0524-4

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

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Gen. Tech. Rep. FOREST PRODUCTS LABORATORY-GTR-113. MADISON, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508 p., 2010.

FREITAS, A.S.; GONÇALEZ, J.C.; DEL MENEZZI, C.H. Tratamento Termomecânico e seus Efeitos nas Propriedades da *Simarouba amara* (Aubl.). **Floresta e Ambiente Seropédica**, v.23, n.4, p.565-572, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.144115.

FU, Q.; CLOUTIER, A.; LAGHDIR, A.; STEVANOVIC, T. Surface Chemical Changes of Sugar Maple Wood Induced by Thermo-Hygro-mechanical (THM) Treatment. **Materials (Basel)**, v.17, n.12, 2019. DOI: 10.3390/ma12121946.

GAFF, M.; GASPARÍK, M.; BABIAK, M.; VOKATY, V. Bending characteristics of hardwood lamellae in the elastic region. **Composites Part B: Engineering**, v.116, n.1, p.61-75, 2017. DOI: j.compositesb.2016.12.058.

GASPARÍK, M.; GAFF, M.; SAFARÍKOVÁ, L.; VALLEJO, C.; SVOBODA, T. Impact bending strength and Brinell hardness of densified hardwoods. **BioResources**, v.11, n.4, p.8638-8652, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.4.8638-8652

GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G. de; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; TREVISAN, R.; DENARDI, L. Proportion of juvenile wood of açoita-cavalo, pecan

and London plane wood. **International Wood Products Journal**, London, v.4, n.1, p.33-36, 2012.

GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R.; BULIGON, E. A.; CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M.; OLIVEIRA, L. da S. Estimativa da idade de segregação do lenho juvenil e adulto para *Platanus x acerifolia* (Ait.) Willd. **Cerne**, Lavras, v.13, n.4, p.393-398, 2007.

GÉRARDIN, P. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood - a review. **Annals of Forest Science**, v.73, n.3, p.559-570, 2016.

GLASS, S.V.; ZELINKA, S.L. **Moisture Relations and Physical Properties of Wood**. Wood handbook. Wood as an engineering material. Madison, WI. Chapter, v. 4, 2010.

GONG, M.; LAMASON, C.; LI, L. Interactive effect of surface densification and post-heat-treatment on aspen wood. **Journal of Materials Processing Technology**, v.210, n.2, p.293–296, 2010. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.013

GONULTAS, O.; CANDAN, Z. CHEMICAL CHARACTERIZATION AND FTIR SPECTROSCOPY OF THERMALLY COMPRESSED EUCALYPTUS WOOD PANELS. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.20, n.3, 2018. DOI: 10.4067/S0718-221X2018005031301

GONZÁLEZ-PEÑA, M.M.; HALE, M.D.C. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 2: Property predictions from colour changes. **Holzforschung**, v.63, n.4, p.394-401, 2009.

GRAFF, M.; RUMAN, D.; GASPARIK, M.; STICHA, V.; BOSKA P. Tensile-shear strength line of laminated veneer lumber. **BioResources**, v.11, n.1, p.1382–1392, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.1.1382-1392

GREAVES A. Gmelina-large scale planting, Jarilanda, Amazon, Basin. **Commonwealth Forestry Review**, v.58, n.2, p: 267-269. 1979.

GREEN, D.W.; BEGEL, M.; NELSON, W. **Janka hardness using nonstandard specimens**, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 13 p., 2006.

GÜNDÜZ, G.; KORKUT, S.; KORKUT, D.S. The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. **Bioresource technology**, Mohali, v.99, n.7, p.2275-2280, 2008.

GUO, J.; SONG, K.; SALMÉN, L.; YIN, Y. Changes of wood cell walls in response to hydro-mechanical steam treatment. **Carbohydrate Polymers**, v. 115, p. 207-214, 2015. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.08.040.

GUPTA, B.S.; REINIATI, I.; LABORIE, M.P.G. Surface properties and adhesion of wood fiber reinforced thermoplastic composites. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.302 n.1–3, p.388-395, 2007. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.03.002

GURAU, L. **The roughness of sanded wood surfaces**. (Doctoral thesis) - Forest Products Research Centre, Brunel University, 2004.

HAKKOU, M.; PETRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; EL BAKALI, I.; GERARDIN, P. Wettability changes and mass loss during heat treatment of wood. **Holzforschung**, Berlin, v.59, p.35-37, 2005.

HEGER, F.; GROUX, M.; GIRARDET, F.; WELZBACHER, C.; RAPP, A.; NAVI, P. Mechanical and durability performance of THM-densified wood. **Final workshop COST action E22 "Environmental optimisation of wood protection"**, 2004.

HEIN, P.R.; SILVA, J.R.; BRANCHERIA, U.L. Correlations among microfibril angle, density, modulus of elasticity, modulus of rupture and shrinkage in 6-year-old *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*. **Maderas. Ciencia Y Tecnología**, v.15, n.2, p.171-82, 2013.

HERRERA, R.; ARATIBEL, A.A.; HOYOS-MARTINEZ L. de.; LABIDI, J.; LLANO-PONTE, R. Evolution of thermally modified wood properties exposed to natural and artificial weathering and its potential as an element for façades systems. **Construction and Building Materials**, v.172, p.233-242, 2018a. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.157

HERRERA, R.; SANDAK, J.; ROBLES, R.; KRISTOFIAK, T.; LABIDI, J. Weathering resistance of thermally modified wood finished with coatings of diverse formulations. **Progress in Organic Coatings**, v.119, p.145-154, 2018b. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.02.015

HIDAYAT, W.; JANG, J.H.; PARK, S.H.; QI, Y.; FEBRIANTO, F.; LEE, S.H.; Kim, N.H. Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of okan (*Cylicodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) wood. **BioResources**, v.10, n.4, p.6961-6974, 2015.

HIKITA, Y.; TOYODA, T.; AZUMA, M. Weathering testing of timber: discoloration. In: Imamura Y. **High performance utilization of wood for outdoor uses**. Kyoto: Press-Net; 2001

HILL, C.A.S. **Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes**. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. 2006.

HILLIS, W. E. Wood quality and utilization. In: HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. (Eds.). **Eucalypts for wood production**. Sydney: CSIRO/Academic Press, p.159-289, 1984.

HORNICK, J.R.; ZERBE, J.I.; WHITMORE, J.L.; Jari's Successes. **Journal of Forestry**, v.82, n.11, p:663-667. 1984.

HOSSAIN, M. K. **Gmelina arborea: A Popular Plantation Species in the Tropics**. FACT sheet. Quick Guide Multipurpose Trees from Around the World. FACT 99 - 05. Forest, Farm and Community Tree Network. Arkansas, USA. 1999.

IAWA Committee. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v.10, n.3, p.221-359, 1989.

IMIRZI, H.O.; ULKER, O.; BURDURLU, E. Effect of densification temperature and some surfacing techniques on the surface roughness of densified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, v.9, n.1, p.191-209, 2014. DOI: 10.15376/biores.9.1.191-209

INARI, G.N.; PETRISSANS, M.; LAMBERT, J.; EHRHARDT, J.; GÉRARDIN, P. XPS characterization of wood chemical composition after heat-treatment. **Surface and Interface Analysis**, v.38, n.10, 2006. DOI: 10.1002/sia.2455

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Identificação macroscópica de madeiras**. 23 p. 2012.

ISO 25178-3: **Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 3**, 2013.

JANKOWSKY, I.P. **Variação sazonal da umidade de equilíbrio para madeira de pinus**. IPEF, n.31, p.41-46, 1985.

JARUSOMBUTI, S.; AYRILMIS, N. Surface characteristics and overlaying properties of flat-pressed wood plastic composites. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.69, n.3, p.375-382, 2011. DOI: 10.1007/s00107-010-0440-z

JONES, D. **Basic guide to identification of hardwoods and softwoods using anatomical characteristics**. Mississippi State University Extension, USA. 2016. Disponível em: <<http://extension.msstate.edu/sites/default/files/publications/publications/p2606.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2018.

JUIZO, C.G.F.; ZEN, L.R.; KLITZKE, W.; FRANÇA, M.C.; CREMONEZ, V.G.; KLITZKE, R.J. Propriedades tecnológicas da madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico. **Nativa**, Sinop, v.6, n.5, p.537-542, 2018. DOI: 10.31413/nativa.v6i5.5666

KACÍKOVÁ, D.; KACÍK, F.; CABALOVÁ, I.; DURKOVIC, J. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. **Bioresource Technology**, Mohali, v.144, p.669-674, 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.110

KAMKE, F.A. Densified Radiata pine for structural composites. **Maderas, Ciencia Y Tecnologia**, v.8, n.2, p.83-92, 2006.

KAMKE, F.A.; KUTNAR, A. Transverse compression behavior of wood in saturated steam at 150-170°C. **Wood Fiber and Science**. v.42, n.3, p.377-387, 2010.

KEAY, R.W.J. **Trees of Nigeria**. A revised version of “Nigerian Trees”. Oxford: Clarendon Press, 1989.

KLOIBER, M.; DRDÁCKYA, M.; MACHADO, J.S.; PIAZZA, M.; YAMAGUCHI, N. Prediction of mechanical properties by means of semi-destructive methods: a review. **Construction and Building Materials**, v.101, n.2, p.1215-1234, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.134

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; BOLUK, Y. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. **BioResources**, v.3, n.2, p.517-537, 2008a.

KOCAEFE, D., PONCSAK, S., DORÉ, G., YOUNSI, R. Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. **Holz Roh Werkst**, v.66, n.5, p.355-361, 2008b. DOI: 10.1007/s00107-008-0233-9

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; TANG, J.; BOUAZARA, M. Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: Thermogravimetric study. **Journal of Materials Science**, v.45, p.681–687, 2010. DOI: 10.1007/s10853-009-3985-7

- KOL, H.S. Characteristics of heat-treated Turkish pine and fir wood after ThermoWood processing. **Journal of Environmental Biology**, v.31, n.6, p.1007-1011. 2010.
- KOLLMANN, F.P.P; COTÉ, J.R.W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer, 1968.
- KUMAR, R.; PANDEY, K.K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid. **Journal of Forestry Research**, v.21, n.4, p.514-516, 2010. DOI: 10.1007/s11676-010-0108-x
- KUTNAR, A.; SERNEK, M. Densification of wood. **Zbornik gozdarstva in lesarstva**, v.82, p.53–62, 2007.
- KOJIMA, M.; YAMAMOTO, H.; MARSOEM, S. N.; OKUYAMA, T.; YOSHIDA, M.; NAKAI, T.; YAMASHITA, S.; SAEGUSA, K.; MATSUNE, K.; NAKAMURA, K.; INOUE, Y.; ARIZONO, T. Effects of the lateral growth rate on wood quality of *Gmelina arborea* from 3.5-, 7- and 12-year-old plantations. **Ann. For. Sci**, v.66, n.5, 2009. DOI: 10.1051/forest/2009031
- LAINÉ, K.; SEGERHOLM, K.; WALINDER, M.; RAUTKARI, L.; ORMONDROYD, G.; HUGHES, M.; JONES, D.; Micromorphological studies of Surface densified wood. **Journal of Materials Science**, v.49, n.5, p.2027–2034, 2014. DOI: 10.1007/s10853-013-7890-8
- LAMB, A.F.A. **Fast growing timber trees of the lowland tropics No.1: *Gmelina arborea***. Compiled by LAMB, A.F.A. Commonwealth Forest Institute, University of Oxford, 1968.
- LARA PALMA, H. A.; LEONELLO, E. C.; BALLARIN, A. W. Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora*. **Cerne**, v.16, p.141-148, 2010.
- LASKOWSKA, A.; MARCHWICKA, M. BORUSZEWSKI, P.; WYSZYNSKA, J. Chemical composition and selected physical properties of Oak wood (*Quercus robur* L.) modified by cyclic thermo-mechanical treatment. **BioResources**, v.13, n.4, p.9005-9019, 2018.
- LAURIDSEN, E.B.; KJAER E.D. Provenance research in *Gmelina arborea* Linn., Roxb. A summary of results from three decades of research and a discussion of how to use them. **International Forestry Review**, v.4, n.1, p:1–15, 2002.
- LENZ, H.; IDLER, C.; HARTUNG, E.; PECENKA, R. Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles. **Biomass and Bioenergy**, v.83, p.269-277, 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.09.018
- 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**, v.52, n.1, p.93-98, 2008.
- LEONELLO, E.C.; BALLARIN, A.W.; OHTO, J.M.; PALMA, H.A.L.; ESCOBAR, J.F. Classificação estrutural e qualidade da madeira do Clone GT 1 de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. **Floresta e Ambiente**. Seropédica, v.19, n.2, p.229-235, 2012.
- LI, Y.; LIU, Z.; DONG, X.; FU, Y.; LIU, Y. Comparison of decay resistance of wood and wood-polymer composite prepared by in-situ polymerization of monomers. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 84, p. 401-406. 2013. DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.03.013

LI, Y.; LIU, Y.; WANG, X.; WU, Q.; YU, H.; LI, J. Wood – polymer composites prepared by the in situ polymerization of monomers within wood. **Journal of Applied Polymer Science**, v.119, p.207-3216, 2010. DOI: 10.1002/app.32837

LIEBL, A.O.; LOIOLA, P.L.; ZEN, L.R.; KLITZKE, R.J.; ROCHA, M.P. da. Influência dos parâmetros dimensionais da pilha na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. Submetida à Secagem ao Ar. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.24, 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.105514.

LIMA, I.L.; GARCIA, J.N. Variação da densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* Hill ex- maiden. **Revista Árvore**. Viçosa. v.34, n.3, p.551-559, 2010.

LONGUI, E.L.; ROMEIRO, D.; PFLEGER, P.; LIMA, I.L.; SILVA JUNIOR, F.G.; GARCIA, J.N.; BORTOLETTO JR, G.; FREIRE NETO, A.O.L.; FLORSHEIM, S.M.B. Radial variation of anatomical features, physicomechanical properties and chemical constituents and their potential influence on the wood quality of 45-year-old *Eucalyptus propinqua*. **Australian Forestry**, v.77, n.2, p.78-85, 2014.

LOPES, C. S. D.; NOLASCO, A. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S.; PANSINI, A. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315 - 322, 2011.

LOURENÇON, T. V.; MATTOS, D.F.; GATTO, D.A.; BULIGON, E.A.; HASELEIN, C.R. Determinação da idade de transição entre lenho juvenil e adulto de três espécies florestais por meio de suas propriedades mecânicas. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.2, p.251-260, 2014.

MAFRA, E.S. **Estudo de algumas propriedades de dez espécies de madeiras de folhosas tropicais**. Dissertação em Engenharia Florestal. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1994.

MAHNERT, K.C.; ADAMOPOULOS, S.; KOCH, G.; MILITZ, H. Topochemistry of heat-treated and N-methylol melamine modified wood of Koto (*Pterygota macrocarpa* K. Schum.) and Limba (*Terminalia superba* Engl. et Diels). **Holzforschung**, v.67, n.2, p.137-146, 2013. DOI 10.1515/hf-2012-0017

MARCENE, E.A.; CORTE, A.P.D; SANQUETTA, C.R.; SCHNEIDER, C.R. Changes in carbon content and individual stock as related to growth of *Gmelina arborea* Roxb. in the Paraná Coastal region, Brazil. **Scientia Forestalis**, n.71, p.55-63. 2006.

MARCHESAN, R. **Caracterização tecnológica da madeira de *Hovenia dulcis* Thunberg para a fabricação de pisos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal– Curitiba, 2016.

MASSERANN, C.; MARIAUX, A. Anisotropie de retrait et structure du bois. Recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres. **Bois et Forêts des Tropiques**, n.209, p.35-47, 1985.

MATTOS, B.D.; GATTO, D.A.; STANGERLIN, D.M.; CALEGARI, L.; MELLO, R.R. de; SANTINI, E.J. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, n.1, p.121-126, 2011. DOI: 10.5039/agraria.v6i1a1080

MELO, R.R.; DEL MENEZZI, C.S. Estimativas das propriedades físico-mecânicas de compostos LVL confeccionados com Paricá por meio de ultrassom. **Ciência Florestal**, v.26, n.1, p.263-272, 2016. DOI: 10.5902/1980509821118

MELO, R.R.; ROCHA, M.J.; RODOLFO JR, F.; STANGERLIN, D.M. Análise da influência do diâmetro no rendimento em madeira serrada de cambará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.36, n.88, p.393-398, 2016. DOI: 10.4336/2016.pfb.36.88.1151.

MENDES, L.M.; ARCE, J.E. Análise Comparativa das Equações Utilizadas para Estimar a Umidade de Equilíbrio da Madeira. **Cerne**, Lavras, v.9, n.2, p.141-152, 2003.

METSÄ-KORTELAJINEN, S.; VIITANEN, H. Wettability of sapwood and heartwood of thermally modified Norway spruce and Scots pine. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.70, n.1-3, p.135–139, 2012.

MILITZ, H., Heat treatment technologies in Europe: Scientific Background and Technological State of Art. **Proceedings of Conference – Enhancing the durability of lumber and engineered wood products**. Kissimmee, Orlando. Forest Product Society, Madison, US, 2002.

MILITZ, H.; ALTGEN, M. Processes and Properties of Thermally Modified Wood Manufactured in Europe. **Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials**, v.1158, p.269-285, 2014. DOI: 10.1021/bk-2014-1158.ch016

MINÁ, A.J.S.; DIAS, A.A. Estacas de madeira para fundações de pontes de madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v.10, p.129-155, 2008.

MISSIO, A.L.; MATTOS, B.D.; CADEMARTORI, P.H.G.; PERTUZZATTI, A.; CONTE, B.; GATTO, D.A. Thermochemical and physical properties of two fast-growing eucalypt woods subjected to two-step freeze–heat treatments. **Thermochemica Acta**, v.615, p.15-22. 2015. DOI: 10.1016/j.tca.2015.07.005

MITCHUAL, S.J.; MINKAH, M.A.; OWUSU, F.W.; OKAI, R. Planing and turning characteristics of *Gmelina arborea* grown in two ecological zones in Ghana. **Advances in Research**, v.14, n.2, p.1-11, 2018. DOI: 10.9734/AIR/2018/39024

MITSUI, K.; TAKADA, H.; SUGIYAMA, M.; HASEGAWA, R.; Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 1. Effect of treatment conditions on the change in color. **Holzforschung**, v.55, p.601-605, 2001.

MOHEBBY, B; SHARIFNIA-DIZBONI, H.; KAZEMI-NAJAFI, S.; Combined Hydro-Thermo-Mechanical Modification (CHTM) as an Innovation in Mechanical Wood Modification. **European Conference on Wood Modification**, Stockholm, Sweden, p.353-362, 2009.

MORSING, N.; HOFFMEYER, P. **Densification of Wood**: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to grain. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU). BYG-Rapport, No. R-79. 1998.

MORSING, N. **Densification of wood. The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain**. PhD. Thesis n.79, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, 145 p., 2000.

MOYA-ROQUE, R. Estudios de las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de melina (*Gmelina arborea*) creciendo em Costa Rica. **Boletín Desde el**



**Bosque.** Órgano Informativo de la Cámara Costarricense Forestal, v.9, n.3, p. 22-27, 2001.

MOYA-ROQUE, R.; MARIN, J.D. Grouping of *Tectona grandis* (L.f.) clones using wood color and stiffness. **New Forests**, Dordrecht, v.42, p.329-345, 2011.

MOYA-ROQUE, R.; RODRIGUEZ-ZÚÑIGA, A.; PUENTE-URBINA, A. Thermogravimetric and devolatilization analysis for five plantation species: effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters. **Thermochimica Acta**, v.647, p.36-48, 2017. DOI: 10.1016/j.tca.2016.11.014

MOYA-ROQUE, R.; RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, A.; PUENTE-URBINA, A.; GAITÁN-ÁLVAREZ, J. Study of light, middle and severe torrefaction and effects of extractives and chemical compositions on torrefaction process by thermogravimetric analysis in five fast-growing plantations of Costa Rica. **Energy**, v.149, p.1-10, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.049

MOYA-ROQUE, R.; TENÓRIO, C. Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. **Biomass Bioenergy**, v.56, p.14-21, 2013. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.04.013

MOYA-ROQUE, R.; TOMAZELLO FILHO, M. Variation in the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees at different ecological conditions in Costa Rica. **Revista Biología Tropical**, San José, v.56, n.2, p.689- 704, 2008.

MOYA-ROQUE, R.; TOMAZELLO FILHO, M. Wood density and fiber dimensions of *Gmelina arborea* in fast growth trees in Costa Rica: relation to the growth rate. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v.16, n.3, p.267-276, 2007.

MÜLLER, B.V.; ROCHA, M.P. DA; CUNHA, A.B.; KLITZKE, R.J.; NICOLETTI, M.F. Avaliação das principais propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.4, p.535-542, 2014. DOI: 10.1590/2179-8087.050413

MÜLLER, B.V.; ROCHA, M.P. da; KLITZKE, R.J.; SILVA, J.R.M. da; CUNHA, A.B. da. Produção de madeira serrada com cinco espécies de eucalipto resistentes à geadas. **ADVANCES IN FORESTRY SCIENCE**, Cuiabá, v.4, n.4, p.195-201, 2017.

MUÑOZ, G.I.B. de; LOMELÍ-RAMÍREZ, M.G.; MANGRICH, A.S.; CARBAJAL-ARIZAGA, G.G. Fast qualitative method based on electron paramagnetic resonance (epr) to date *Gmelina arborea* and *Araucaria angustifolia* wood. **Agrociencia**, v.48, n.7, p.739-749, 2014.

MUÑOZ, F.; MOYA-ROQUE, R. Moisture content variability in kiln dried *Gmelina arborea* wood: effect of radial position and anatomical features. **Journal of Wood Science**, v.54, n.4, p.318–322, 2008. DOI: 10.1007/s10086-008-0954-8

MUÑOZ, F.; VALENZUELA, P.; GACITUA, W. *Eucalyptus nitens*: nanomechanical properties of bark and wood fibers. **Applied Physics A**, v.108, n.4, p.1007-14. 2012.

MUÑOZ, H. J.; SÁENZ, J. T.; OROZCO, G.; BENAVIDES, J.D.; PRIETO, A. R. **Evaluación de Plantaciones Forestales Comerciales en el Trópico Seco del Estado de Michoacán.** Folleto Técnico Núm. 21. SAGARPA. INIFAP. CIRPAC. Campo Experimental Uruapan, Michoacán, México. 2010.

MURARA JR., M.I.; ROCHA, M.P.da.; TRUGILHO, P.F. Estimativa do rendimento em madeira serrada de pinus para duas metodologias de desdobro. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.20, n.4, p.556-563, 2013. DOI: 10.4322/floram.2013.037.

NAIRN, J.A. Numerical simulations of transverse compression and densification in wood. **Wood and Fiber Science**, v.38, n.4, p.576-591, 2006.

NAVI P., HEGER F. Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood. **Construction Materials: From Innovation to Conservation**, v. 29, n.5, p.332-336, 2004.

NAVI, P.; GIRARDET, F.; VULLIEMIN, P.; SPYCHER, M.; HEGER, F. Effects of post-treatment parameters on densified wood set-recovery. In: **Proceedings of Third International Symposium on Wood Machining**, 2007.

NAVI, P.; SANDBERG, D. **Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood**. EPEL Press, Lausanne, Switzerland, 2012.

NEYSES, B.; HAGMAN, O.; SANDBERG, D.; NILSSON, A. Development of a continuous wood surface densification process: The roller pressing technique, in: **Proceedings of the 59th International Convention of Society of Wood Science and Technology**, 6-10 March, Curitiba, Brazil, p. 17-24. 2016.

NUGHORO, W.D.; MARSOEM, S.N.; YASUE, K.; FUJIWARA, T.; NAKAJIMA, T.; HAYAKAWA, M.; NAKABA, S.; YAMAGISHI, Y.; JIN, H.; KUBO, T.; FUNADA, R. Radial variations in the anatomical characteristics and density of the wood of *Acacia mangium* of five diferente provenances in Indonesia. **Journal of Wood Science**, v.58, n.3, p.185-194, 2012.

OBATAYA, E. Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments. **Journal of Cultural Heritage**, v.27, p.63-69, 2017. DOI: 10.1016/j.culher.2016.02.011

OLIVEIRA, J.T.S.; FILHO, M.T.; FIEDLER, N.C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.5, p.929-936, 2010. DOI: 10.1590/S0100-67622010000500018

ONYEKWELU, J.C., STIMM, B. *Gmelina arborea*. In: **Enzyklopädie der Holzgewächse – 28 Erg. Lfg.** Ecomed Publishers, Munich, Germany, 2002.

ONYEKWELU, J.C.; Above-ground biomass production and biomass equations for even-aged *Gmelina arborea* (Roxb) plantations in south-western Nigeria. **Biomass and Bioenergy**, v.26, n.1, p.39-46, 2004.

ONYEKWELU, J.C.; MOSANDL, R.; STIMM, B. Productivity, site evaluation and state of nutrition of *Gmelina arborea* plantations in Oluwa and Omo forest reserves, Nigeria. **Forest Ecology and Management**, v.229, n.1-3 p.214–227, 2006. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.04.002

ORWA, C.; MUTUA, A.; KINDT, R.; JAMNADASS, R.; ANTHONY, S. **Agroforestry Database**: uma referência de árvore e guia de seleção versão 4.0. 2009. Disponível em: <http://www.worldagroforestry.org> Acesso em: 17 out. 2018.

PADILHA, C. **Avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus* sp para utilização em pisos**. 71 p. Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavra, Lavras, 2005.

- PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; SEVERO, E. T. D.; NASCIMENTO, A. M.; REZENDE, M. A. Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.1, p.191-200, 2013.
- PALMER, E.R. Forestry in Brazil — Amazonia. **The Commonwealth Forestry Review**, v.56, n.2, p.115-130. 1977
- PANDEY, D. **Forest resources assessment 1990**. Tropical forest plantation resources. FAO forestry paper 128, 1995.
- PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4. ed. New York: McGraw Hill, 722 p.,1980.
- PAULA, M.O.; LOIOLA, P.L.; MOREIRA, G.R.; SEGUNDINHO, P.G.A. Análise termomecânica da madeira de *Corymbia citriodora* submetida a gradientes térmicos. **Floresta e Ambiente**. Seropédica, v.21, n.3, p.358-368, 2014. DOI: 10.1590/2179-8087.032613.
- PEDRO, F.S.; JUÍZO, C.G.F.; ROCHA, M.P.; BILA, N.F.; UETIMANE, E. Avaliação do rendimento em madeira serrada de eucalipto para dois modelos de desdobro numa serraria portátil. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.4, p.543-550, 2014.
- PELIT, H.; SÖNMEZ, A.; BUDAKCI, M. Effects of ThermoWood® Process Combined with Thermo-Mechanical Densification on some Physical Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). **Bioresources** v.9, n.3, p.4552–4567, 2014. DOI: 10.15376/biores.9.3.4552-4567
- PERES, M.L.; GATTO, D.A.; STANGERLIN, D.M.; CALEGARI, L.; BELTRAME, R.; HASELEIN, C.R.; SANTINI, E.J. Idade de segregação do lenho juvenil e adulto pela variação da massa específica de açoita-cavalo. **Ciência Rural**, v.42, n.9, p.1596-1602, 2012.
- PERTUZZATTI, A.; MISSIO, A.L.; CADEMARTORI, P.H.G.; SANTINI, E.J.; HASELEIN, C.R.; BERGER, C.; GATTO, D.A.; TONDI, G. Effect of process parameters in the thermomechanical densification of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* fast-growing wood. **Bioresources**, v.13, n.1, p.1576-1590, 2018. DOI: 10.15376/biores.13.1.1576-1590
- PÉTRISSANS, A.; YOUNSI, R.; CHAOUCH, M.; GÉRARDIN, P.; PÉTRISSANS, M. Wood thermodegradation: experimental analysis and modeling of mass loss kinetics. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.16, n.2, p.133-148, 2014. DOI: 10.4067/S0718-221X2014005000011
- PIAO, C.; WINANDY, J.E.; SHUPE, T.F. From hydrophilicity to hydrophobicity: a critical review: Part I. Wettability and surface behavior. **Wood and Fiber Science**, v.42, n.4, p.490-510, 2010.
- PIOTTO, D.; MONTAGNINI, F.; UGALDE, L.; KANNINEN, M. Performance of forest plantations in small and medium-sized farms in the Atlantic lowlands of Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v.175, n.1–3, p.195-204, 2003.
- PINCELLI, A.L.P.S.M.; MOURA, L.F.; BRITO, J.O. Effect of thermal rectification on colors of *Eucalyptus saligna* and *Pinus caribaea* woods. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.14, n.2, p.239-249, 2012. DOI: 10.4067/S0718-221X2012000200010
- PLANT RESOURCES OF TROPICAL AFRICA - PROTA, 2016. **Banco de dados da Web PROTAU**. Recursos Vegetais da África Tropical. Disponível em: <<https://www.nhbs.com>>. Acesso em 17 out. 2018.

POUBEL, D. S.; GARCIA, R.A.; LATORRACA, J.V. DE F.; CARVALHO, A.M. DE. Estrutura Anatómica e Propriedades Físicas da Madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.18, n.2, p.117-126, 2011. DOI: 10.4322/loram.2011.029

PRIADI, T.; HIZIROGLU, S. Characterization of heat treated wood species. **Materials & Design**, v.49, p.575-582, 2013. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.12.067

PUGLIA, D.; BIAGIOTTI, J.; KENNY, J.M. A review on natural fibre-based composites-part II. **Journal of Natural Fibers**, v.1, n.3, p.23-65, 2005. DOI: 10.1300/J395v01n03\_03

RAABE, J.; DEL MENEZZI, C.; GONCALEZ, J. Avaliação da Superfície de Lâminas Decorativas de Curupixá (*Micropholis venulosa* Mart. Eichler). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.24, 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.005415.

RANDRIAMANANTENA, T.; AZAFINDRAMISA F.L.; RAMANANTSIZEHENU G.; BERNES A.; LACABANE C. Thermal behaviour of three woods of Madagascar by thermogravimetric analysis in inert atmosphere. In: HIGH-ENERGY PHYSICS INTERNATIONAL CONFERENCE, 4., 2009, Madagascar. Anais. Madagascar: 2009.

RAMAGE, M.H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D.U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P.F.; SCHERMAN, O. The wood from the trees: the use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.68, p.333-359, 2017.

RASINENI, G.K.; GUHA, A.; REDDY, A.R. Responses of *Gmelina arborea*, a tropical deciduous tree species, to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>: Growth, biomass productivity and carbon sequestration efficacy. **Plant Science**, v.181, n.4, p.428-438, 2011.

RAUTKARI, L.; LAINE, K.; KUTNAR, A.; MEDVED, S.; HUGHES, M. Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification. **Journal of Materials Science**, v.48, n.6, p.2370–2375, 2013. DOI: 10.1007/s10853-012-7019-5

RAUTKARI, L.; LAINE, K.; LAFLIN, N.; HUGHES, M. Surface modification of Scots pine: the effect of process parameters on the through thickness density profile. **Journal of Materials Science**, v.46, n.14, p.4780–4786, 2011. DOI: 10.1007/s10853-011-5388-9

REDMAN, A.L.; BAILLERES, H.; TURNER, I.; PERRÉ, P. Characterisation of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade. **Wood Science and Technology**, v.50, n.4, p.739-757, 2016. DOI: 10.1007/s00226-016-0818-0

REYNOLDS, M.S. **Hydro-Thermal Stabilization of Wood-Based Materials**. Master Thesis. Virginia Tech, Blacksburg, Virginia: 155 p., 2004.

RIDLEY-ELLIS, D.; MOORE, J.; LYON, A.J.; SEARLES, G.J.; GARDINER, B.A. Strategic Integrated Research in Timber: Getting the Most Out of the UK's Timber Resource. **Non-conventional Materials and Technologies**. 2009.

RIVERO, J. **Determinación de propiedades físicos-mecânicas de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* Linn, F. proveniente de plantaciones experimentales del Vale de Sacta Cochabamba**. 121 p. Tesis (Maestria) – Escuela de Ciencias Forestales, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, 2004.

ROCHA, M.P.da. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria-prima para serrarias**. 186 f. (Tese) - Doutorado em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

ROCHA, M.P.da; TOMASELLI, I. Efeito do modelo de desdobro na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. **Cerne**, Lavras, v.8, n.2, p.73-86, 2002

ROJAS-RODRÍGUEZ, F.; ARIAS-AGUILAR, D.; MOYA-ROQUE, R.; MEZA-MONTOYA, A.; MURILLO-GAMBOA, O.; ARGUEDAS-GAMBOA, M. **Manual para Productores de Melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica**. Cartago, Costa Rica. 2004.

SADATNEZHAD, S. H.; KHAZAEIAN, A.; SANDBERG, D.; TABARSA, T. Continuous surface densification of wood: A new concept for large-scale industrial processing. **BioResources**, v.12, n.2, p.3122-3132, 2017. DOI: 10.15376/biores.12.2.3122-3132

SANDAK, A.; SANDAK, J.; ALLEGRETTI, O. Quality control of vacuum thermally modified wood with near infrared spectroscopy. **Vacuum**, v.114, p.44-48, 2015. DOI: 10.1016/j.vacuum.2014.12.027

SANDAK, J.; NEGRI, M.; Wood surface roughness - What is it, **Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar (IWMS 17)**, Rosenheim, Germany, p 26-28, 2005.

SANDBERG, D.; HALLER, P.; NAVI, P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. **Wood Material Science & Engineering**, v.8, n.1, p.64-88, 2013. DOI: 10.1080/17480272.2012.751935

SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; Thermal modified timber (tmt): recent development in Europe and North America. **Wood and fiber science**, v.48, p.28-39, 2016.

SANDOVAL-TORRES, S.; JOMAA, W.; MARC, F.; PUIGGALI, J-R. Causes of color changes in wood during drying. **Forestry Studies in China**, v.12, n.4, p.167-175, 2010. DOI 10.1007/s11632-010-0404-8

SANTOS, C.M.T.; DEL MENEZZI, C.H.; SOUZA, M.R. Properties of thermo-mechanically treated wood from *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **BioResources**, v.7, n.2, p.1850-1865, 2012. DOI: 10.15376/biores.7.2.1850-1865

SCHNABEL, T.; ZIMMER, B.; PETUTSCHNIGG, A.J.; SCHÖNBERGER, S. An approach to classify thermally modified hardwoods by color. **Forest Products Journal**, v.57, n.9, p.105-110, 2007.

SCHULGASSER, K.; WITZTUM A. How the relationship between density and shrinkage of wood depends on its microstructure. **Wood Science and Technology**, v.49, n.2, p.389-401. 2015.

SCHWEINGRUBER, F.H.; BÖRNER, A.; SCHULZE, E.D. **Atlas of Stem Anatomy in Herbs**. Shrubs and Trees, v.2, Springer, Heidelberg, 2012.

SEBORG, R.M.; MILLETT, M.A., STAMM, J.A. Heat-stabilized compressed wood. (Staypak). **Mechanical Engineering**, v.67, p.25-31, 1945.

SHEN, H.; CAO, J.; SUN, W.; PENG, Y. Influence of post-extraction on photostability of thermally modified scots pine wood during artificial weathering. **BioResources**, v.11, n.2, p.4512-4525, 2016.

SHESHMANI, S. Effects of extractives on some properties of bagasse/high density polypropylene composites. **Carbohydrate Polymers** v.94, p.416-419, 2013. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.01.067

SHUKLA, S.R.; KAMDEM, D.P. Microstructural characterization and evaluation of certain important physical properties of thuja burl wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepción, v.20, n.2, p.239-248, 2018. DOI: 10.4067/S0718-221X2018005002701.

SIAU, J.F. **Wood: Influence of Moisture on Physical Properties**. Dept. of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1995.

SILVA, D.A.L.; LAHR, F.A.R.; FARIA, O.B.; CHAHUD, E. Influence of wood moisture content on the modulus of elasticity in compression parallel to the grain. **Materials Research**, v.15, n.2, p.300-304, 2012.

SILVA, F.A.V. da; SILVA, J.R.M. da; MOULIN, J.C.; NOBRE, J.R.C.; ANDRADE, A.C.A.; CASTRO, J.P. Qualidade da superfície usinada em pisos de madeirade *Corymbia* e *Eucalyptus*. **Floresta**. Curitiba, PR, v. 46, n.3, p.397-403, 2016. DOI: 10.5380/ufv.46i3.43936397

SIMPSON, W.T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991.

SKYBA, O. **Durability and Physical Properties of Thermo-Hygro-Mechanically (THM) densified Wood**. 167p. Tese (Doutorado). Ucrânia, 2008.

SRINIVAS, K.; PANDEY, K.K. Photodegradation of thermally modified wood. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.117, p.140-145, 2012. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2012.09.013

STAMM, A.J.; BURR, H.K.; KLINE, A.A. Stayb-wood-A heat stabilized wood. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.38, n.6, p.630-634, 1946. DOI: 10.1021/ie50438a027

STAMM, M. **Polymer Surfaces and Surfaces**. Springer, Germany, 2008.

STANGERLIN, D.M.; SANTINI, E.J.; SUSIN, F.; MELO, R.R.; GATTO, D.A.; HASELEIN, C.R. Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. **Ciência Florestal**, v.19, n.4, p.461-472, 2009. DOI: 10.5902/19805098900.

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 154 f. Thesis (Doctor in Wood Material Science) - Lulea University of Technology, Skelleftea, 2004.

SWAMY, S. L.; KUSHWAHA, S. K.; PURI, S. Tree growth, biomass, allometry and nutrient distribution in *Gmelina arborea* stands grown in red lateric soils of Central India. **Biomass & Bioenergy**, London, v.26, p.305-317, 2004.

TAPPI TEST METHODS. T 204 cm-97. **Solvent extractives of wood and pulp**. 1997.

TAPPI TEST METHODS. T 211 om-02. **Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C**. Revised-2002.

TAPPI TEST METHODS. T 222 om-02. **Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. Revised-2002.

TAPPI TEST METHODS. T 257 cm-02. **Sampling and preparing wood for analysis**. 2002.

TEREZO, R.F.; SZÜCS, C.A. VALLE, A.do; SAMPAIO, C.A.P.; STÜPP, A.M. Propriedades da madeira de paricá em diferentes idades para uso estrutural. **Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science). SPECIAL ISSUE – II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira (CBCTEM), Belo Horizonte (MG), 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p244-253

TJEERDSMA, B.F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v.63, n.2, p.102-111, 2005. DOI: 10.1007/s00107-004-0532-8

TODOROVIC, N.; POPOVIC, Z.; MILIC, G.; POPADIC, R. Estimation of heat-treated beechwood properties by color change. **BioResources**, v.7, n.1, p.799-815, 2012.

TOMAK, E.D.; USTAOMER, D.; ERMEYDAN, M.A.; YILKDIS, S. An investigation of surface properties of thermally modified wood during natural weathering for 48 months. **Measurement**, v.127, p.187-197, 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.05.102

TOMAK, E.D.; USTAOMER, D.; YILDIZ, S.; PESMAN, E. Changes in surface and mechanical properties of heat treated wood during natural weathering. **MEASUREMENT**, v.53, p.30-39, 2014. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.03.018

TREJOS, G.G.; MONTERO, R.S. Propiedades y utilizaciones de la madera de melina (*Gmelina arborea* Roxb) procedente de árboles plantados en Costa Rica. Kurú: **Revista Forestal**, Costa Rica, v.1, n.1, 2004.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C.R.; SANTINI, E.J.; SCNEIDER, P.R.; MENEZES, L.F. de. Efeitos da intensidade de desbaste nas características dendrométricas e tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v.17, n.4, p.377-87, 2007. DOI: 10.5902/198050981969

TRIANOSKI, R.; MATOS J.L.M.; IWAKIRI S.; PRATA, J.G. Avaliação das propriedades mecânicas da Madeira de species de Pinus Tropicais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.42, n.101, p.21-28, 2014.

ULKER, O.; HIZIROGLU, S. Some Properties of Densified Eastern Redcedar as Function of Heat and Pressure. **Materials**, v.10, n.11, 2017. DOI: 10.3390/ma10111275

ULKER, O.; IMIRZI, O.; BURDURLU, E. The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, v.7, n.4, p.5581-5592, 2012.

UMIT, C.; GERCEK, Z.; SERDAR, B.; YILDIZ, S.; GEZER, E.D.; TOMAK, E.D.; TEMIZ, A. The effects of heat treatment on anatomical changes of beech wood, **Conference: International Research Group on Wood Preservation**. 2004.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Washington, DC: USDA, 1999.

UNSAI, O.; CANDAN, Z.; BUYUKSARI, U.; KORKUT, S.; CHANG, Y.S.; YEO, H. Effect of Thermal Compression Treatment on the Surface Hardness, Vertical Density Profile and Thickness Swelling of Eucalyptus Wood Boards by Hot-pressing. **Journal of the Korean wood science and technology**, v.39, n.2, p.148-155, 2011. DOI: 10.5658/WOOD.2011.39.2.148

UNSAI, O.; KARTAL, S.N.; CANDAN, Z.; ARANGO, R.A.; CLAUSEN, C.A.; GREEN, F. Decay and termite resistance, water absorption and swelling of thermally compressed wood panels. **International biodeterioration & biodegradation**, v.63, n.5, p.548-552, 2009. DOI: 10.1016/j.ibiod.2009.02.001

VALLEJOS, J.; MOYA-ROQUE, R.; SERRANO, R.; Effects of thinning on diameter, heartwood, density and drying defects of *Gmelina arborea*. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.17, n.2, p.365 - 372, 2015. DOI:10.4067/S0718-221X2015005000034

VASCONCELOS, R.; DEL MENEZZI, C.H. Utilization of a three-step thermo-mechanical treatment to modify wood properties. **The 19th international conference on composite materials**. 2013.

VERMA, P.; BIJALWAN, A.; SHANKHWAR, A.K.; DOBRIYAL, M.J.R.; JACOB, V.; RATHAUDE, S.K. Scaling up an Indigenous Tree (*Gmelina arborea*) Based Agroforestry Systems in India. **International Journal of Science and Qualitative Analysis**, v.3, n.6, p.73-77, 2017. DOI: 10.11648/j.fem.20170306.11

VIDAURRE, G.B.; VITAL, B.R.; OLIVEIRA, A. de C.; OLIVEIRA, J.T. da S.; MOULIN, J.C.; SILVA, J.G.M. da; SORANSO, D.R. Physical and mechanical properties of juvenile *Schizolobium amazonicum* wood. **Revista Árvore**, Viçosa, v.42, n.1, 2018. DOI: 10.1590/1806-90882018000100001.

VOULGARIDIS, I.; PASIALIS, K.; VASILEIOU, V. **Wood identification**. (Academic press ed.) Aristotle University of Thessaloniki, Greece, p.1–20, 2000.

WAHYU, H.; JANG, J.H.; PARK, S.H.; QI, Y.; FEBRIANTO, F.; LEE, S.H.; KIM, N.H. Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of Okan (*Cylicodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) wood. **BioResources**, v.10, n.4, p.6961-6974, 2015.

WEHSENER, J.; BRISCHKE, C.; MEYER-VELTRUP, L.; HARTIG, J.; HALLER, P. Physical, mechanical and biological properties of thermo-mechanically densified and thermally modified timber using the Vacu3-process. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.76, n.3, p.809–821, 2018. DOI: 10.1007/s00107-017-1278-4

WHITEHOUSE, D.J. **Handbook of Surface and Nanometrology**, New York: CRC Press, Taylor & Francis. wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v.89, n.1, p.1–5, 2011.

WILLIAMS R.S. **Finishing of Wood**. In: Wood Handbook. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, p.16-1-16-39 Madison, Chapter 16, 2010.

WINDEISEN E.; WEGENER, G. Behaviour of lignin during thermal treatments of wood. **Industrial Crops and Products**, v.27, n.2, 2008. DOI:10.1016/j.indcrop.2007.07.015.

XING, D.; LI, J.; WANG, X. Effect of Artificial weathering on the properties of industrial-scale thermally modified wood. **BioResources**, v.10, n.4, p.8238-8252, 2015. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.05.004

XING, D.; LI, J.; WANG, X.; WANG, S. In situ measurement of heat-treated wood cell wall at elevated temperature by nanoindentation. **Industrial Crops and products**, v.87, p.142-149, 2016. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.04.017

YILDIZ, S.; TOMAK, E.D.; YILDIZ, U.C.; USTAOMER, D. Effect of artificial weathering on the properties of heat treated wood. **Polymer Degradation and**



**Stability**, v.98, n.8, p.1419-1427, 2013. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.05.004

YIN, J.; YUAN, T.; LU, Y.; SONG, K.; LI, H.; ZHAO, G.; YIN, Y. Effect of compression combined with steam treatment on the porosity, chemical composition and cellulose crystalline structure of wood cell walls, **Carbohydrate Polymers**, v.155, p.163-172, 2017. DOI: 10.1016 / j.carbpol.2016.08.013

YUAN, B.; JI, X.; NGUYEN, T.T.; HUANG, Z.; GUO, M. UV protection of wood surfaces by graphitic carbon nitride nanosheets. **Applied Surface Science**, v.467–468, 2019, p.1070-1075. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.251>

YUAN, Y.; LEE, T.R. Contact angle and wetting properties. In: Bracco G, Holst B, editors. **Surface sciences techniques**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013.

ZANUNCIO, A.J.V.; CARVALHO, A.G.; CARNEIRO, A.C.O.; COLODETTE, J.L.; ROCHA, M.F.V. Chemical and energetic characterization of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* clones subject to wind damage. **Revista Árvore**, Viçosa, v.43, n.4, 2019. DOI: 10.1590/1806-90882019000400001

ZANUNCIO, A.J.V.; NOBRE, J.R.C.; MOTTA, J.P.; TRUGILHO, P.F.; Química e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden termorretificada **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.4, p.765-770, 2014. DOI: 10.1590/S0100-67622014000400020

ZAUER, M.; KOWALEWSKI, A.; SPROßMANN, R.; STONJEK, H.; WAGENFÜHR, A. Thermal modification of European beech at relatively mild temperatures for the use in electric bass guitars. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.74, n.1, p.43-48, 2016. DOI: 10.1007/s00107-015-0973-2

ZHU, J.; NAKANO, T.; HIRAKAWA, Y. Effects of radial growth rate on selected indices for juvenile and mature wood of the Japanese larch. **Journal of Wood Science**, v.46, n.6, p.417-422, 2000.

ZOBEL, B.J.; BUIJTENEN J.V. **Wood Variation, its Causes and Control**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1989.

## APÊNDICES

### APÊNDICE 1. VALOR MÉDIO, MÍNIMO, MÁXIMO E DESVIO PADRÃO DA AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Diâmetro do vaso ( $\mu\text{m}$ )	150,90	69,11	289,42	50,76
Frequência de vaso ( $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$ )	6,90	2,00	20,00	2,79
Altura de raio ( $\mu\text{m}$ )	322,01	22,46	927,65	116,64
Largura de raio ( $\mu\text{m}$ )	64,65	31,32	105,83	16,30
Frequência de raio ( $\text{n}^\circ/\text{mm}$ )	3,60	2,00	7,00	1,07

### APÊNDICE 2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O RENDIMENTO EM MADEIRA SERRADA DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Rendimento em madeira serrada					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	2	340,724	170,362	4,15*	0,0368
Resíduos	15	615,748	41,0499		
Total	17	956,472			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

### APÊNDICE 3. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DE VASOS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Vasos da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	34432,5	17216,2	7,04*	0,0011
Resíduos	222	542840	2445,23		
Total	224	577273			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

Frequência de vasos da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	140,062	70,0311	9,65*	0,0001
Resíduos	222	1610,59	7,25489		
Total	224	1750,65			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

### APÊNDICE 4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DE RAIOS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Altura do raio da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	123967	61983,3	4,71*	0,0100
Resíduos	222	2,92376E6	13170,1		
Total	224	3,04773E6			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

Largura do raio da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	7070,98	3535,49	14,96*	0,0000
Resíduos	222	52460,4	236,308		
Total	224	59531,3			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

Frequência de raio da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	0,426667	0,213333	0,18 <sup>ns</sup>	0,8333
Resíduos	222	259,573	1,16925		
Total	224	260,0			

<sup>ns</sup> não significativo ( $p \geq .05$ )

APÊNDICE 5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS VALORES DE CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS DE FIBRAS DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Comprimento da fibra da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	1,65467E7	8,273367E6	236,21*	0,0000
Resíduos	267	9,35194E6	35026,0		
Total	269	2,58987E7			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Diâmetro do lúmen da fibra da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	242,928	121,464	2,94*	0,0545
Resíduos	267	11027,1	41,3001		
Total	269	11270,0			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Espessura da parede da fibra da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	37,9977	18,9988	12,61*	0,0000
Resíduos	267	402,188	1,50632		
Total	269	440,185			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

APÊNDICE 6. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE *Gmelina arborea*

Densidade básica da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Posição	2	0,002111667	0,00105833	0,98 <sup>ns</sup>	0,3872
Resíduos	33	0,0357583	0,00108359		
Total	35	0,037875			

<sup>ns</sup> não significativo (p >= .05)

APÊNDICE 7. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*

Densidade aparente inicial da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	0,000028	0,000005	0,01 <sup>ns</sup>	1,0000
Resíduos	54	0,02907	0,000538		
Total	59	0,02909			

<sup>ns</sup> não significativo (p >= .05)

Densidade aparente após a densificação da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	0,318985	0,0637971	84,10*	0,0000
Resíduos	42	0,0318625	0,0007586		
Total	47	0,350848			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Perda de massa após a densificação da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	4	109,483	27,3707	58,30*	0,0000
Resíduos	35	16,4327	0,46950		
Total	39	125,916			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Teor de umidade de equilíbrio após a densificação da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	133,931	26,7862	55,30*	0,0000
Resíduos	42	20,3439	0,484379		
Total	47	154,275			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Taxa de retração após a densificação da madeira					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	1166,35	233,269	58,29*	0,0000
Resíduos	42	168,074	4,00177		
Total	47	1334,42			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Absorção de água após 2 horas					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	125,955	25,1911	43,76*	0,0000
Resíduos	42	24,18	0,575713		
Total	47	150,135			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Absorção de água após 24 horas					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	778,973	155,795	14,69*	0,0000
Resíduos	42	445,397	10,6047		
Total	47	1224,37			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Absorção de água após 48 horas					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	1719,49	343,898	13,39	0,0000
Resíduos	42	1078,7	25,6834		
Total	47	2798,19			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Absorção de água após 72 horas					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	2414,24	482,848	11,63*	0,0000
Resíduos	42	1743,09	41,5022		
Total	47	4157,33			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Inchamento em espessura após 2 horas					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	2,38109	0,476218	6,66*	0,0001
Resíduos	42	3,00427	0,071530		
Total	47	5,38537			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Inchamento em espessura após 24 horas					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	61,4911	12,2982	9,54*	0,0000
Resíduos	42	54,1343	1,28891		
Total	47	115,625			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Inchamento em espessura após 48 horas					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	262,845	52,5691	14,44*	0,0000
Resíduos	42	152,892	3,6403		
Total	47	415,738			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Inchamento em espessura após 72 horas					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	323,376	64,6752	13,68	0,0000
Resíduos	42	198,506	4,72634		
Total	47	521,882			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

#### APÊNDICE 8. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*

Dureza Janka					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	4,21401E7	8,42803E6	82,20*	0,0000
Resíduos	54	5,53634E6	102525		
Total	59	4,76765E7			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Compressão – Módulo de ruptura (MOR)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	4191,15	838,229	30,52*	0,0000
Resíduos	122	3350,46	27,4628		
Total	127	7541,61			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Módulo de elasticidade dinâmico (MOEd)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	4,52244E7	9,04488E6	9,14*	0,0000
Resíduos	138	1,36548E8	989477		
Total	143	1,81772E8			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

#### APÊNDICE 9. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DA MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*

L* = luminosidade					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	3309,8	661,96	60,66*	0,0000
Resíduos	234	2553,56	10,9127		
Total	239	5863,36			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Coordenada cromática a* (verde – vermelho)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	88,7273	17,7455	74,13*	0,0000
Resíduos	234	56,013	0,23937		
Total	239	144,74			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Coordenada cromática b* (amarelo – azul)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	217,916	43,5832	28,89*	0,0000
Resíduos	234	379,227	1,62063		
Total	239	597,143			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Saturação C*					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	140,509	28,1018	19,93*	0,0000
Resíduos	234	329,968	1,41012		
Total	239	470,477			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Ângulo de tinta h*					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	3287,49	657,498	77,12*	0,0000
Resíduos	234	1995,01	8,5267		
Total	239	5282,5			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

#### APÊNDICE 10. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO ÂNGULO DE CONTATO APARENTE DA MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*

Superfície tangencial					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	16470,2	3294,03	32,80*	0,0000
Resíduos	174	17477,1	100,443		
Total	179	33947,3			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Superfície radial					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	6504,16	1300,83	13,16*	0,0000
Resíduos	174	17198,0	98,829		
Total	179	23702,1			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

#### APÊNDICE 11. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE 3D SUPERFICIAL DA MADEIRA NATURAL E DENSIFICADAS DE *Gmelina arborea*

Rugosidade média (Sa)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	140,429	28,0858	19,37*	0,0000
Resíduos	66	95,6981	1,44997		
Total	71	236,127			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Rugosidade quadrática média (Sq)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	284,191	56,8382	21,27*	0,0000
Resíduos	66	176,327	2,67163		
Total	71	460,518			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Rugosidade total (Sz)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	47513,4	9502,68	52,79*	0,0000
Resíduos	66	11881,5	180,023		
Total	71	59394,9			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Altura reduzida do pico (SpK)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	766,641	153,328	20,08*	0,0000
Resíduos	66	503,921	7,63517		
Total	71	1270,56			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Profundidade da rugosidade do núcleo (SK)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	840,697	168,139	22,48*	0,0000
Resíduos	66	493,549	7,47801		
Total	71	1334,25			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)

Profundidade reduzida do vale (SvK)					
FV	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamentos	5	782,276	156,455	12,62*	0,0000
Resíduos	66	818,239	12,3976		
Total	71	1600,52			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)