

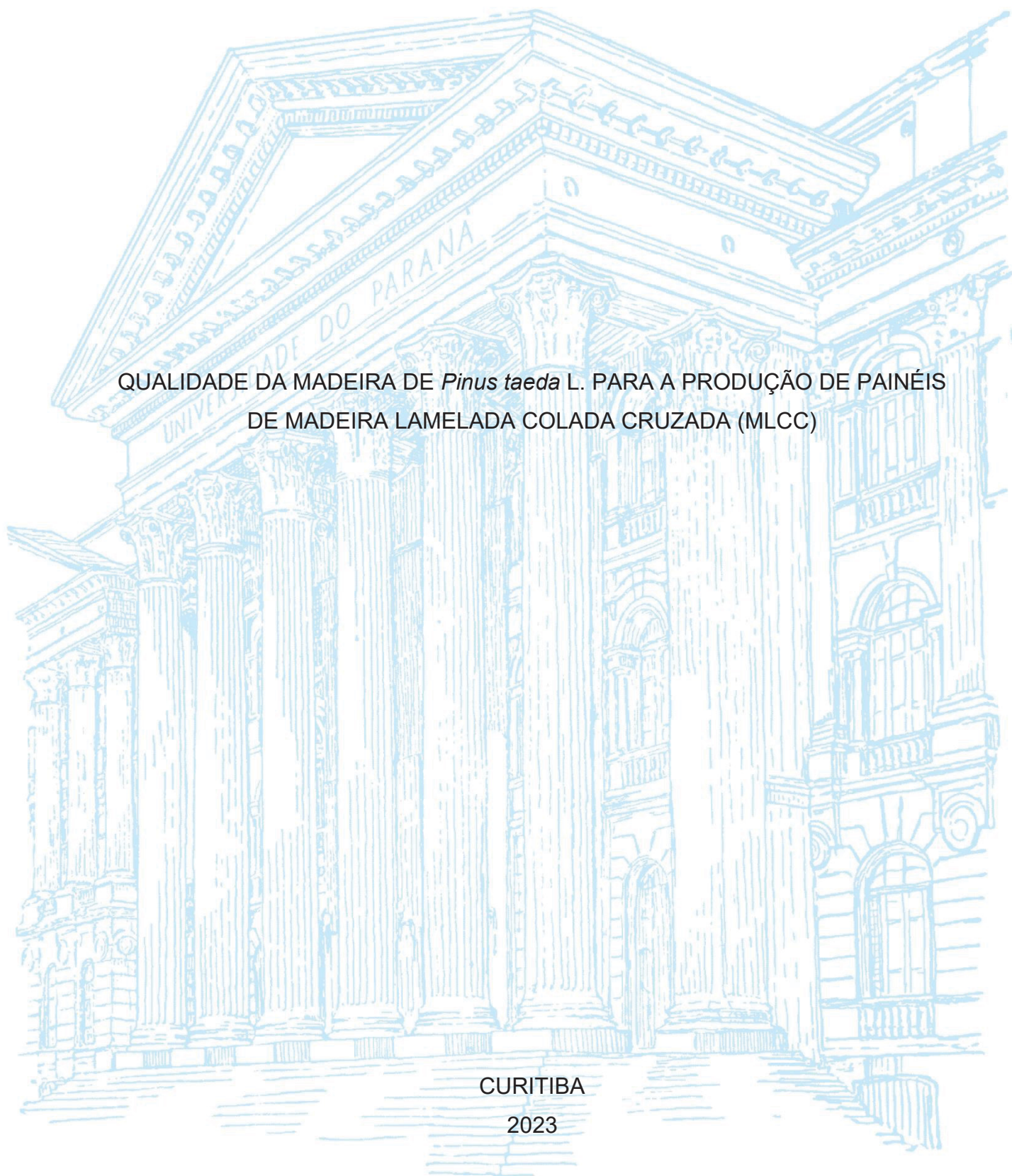
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TALITHA OLIVEIRA ROSA

QUALIDADE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS
DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC)

CURITIBA

2023



TALITHA OLIVEIRA ROSA

QUALIDADE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS
DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC)

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

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

Coorientador(a): Prof(a). Dr(a). Rosilani Trianoski e Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo

CURITIBA

2023

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

Rosa, Talitha Oliveira

Qualidade da madeira de *Pinus Taeda* L. para a produção de painéis de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) / Talitha Oliveira Rosa. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

Coorientadores: Profa. Dra. Rosilani Trianoski

Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 24/03/2023.

1. Madeira - Qualidade. 2. Lâminas de madeira - Qualidade.
3. Pinus taeda. 4. Lâmina de madeira - Produtividade.
5. Construção sustentável. I. Iwakiri, Setsuo. II. Trianoski, Rosilani.
III. Terezo, Rodrigo Figueiredo. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.851

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 ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **TALITHA OLIVEIRA ROSA** intitulada: **QUALIDADE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC)**, sob orientação do Prof. Dr. SETSUO IWAKIRI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de doutora 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, 24 de Março de 2023.

SETSUO IWAKIRI
Presidente da Banca Examinadora

JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

ADAUTO JOSÉ MIRANDA DE LIMA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

JOSÉ DE ALMENDRA FREITAS JUNIOR
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR)

CARLOS FREDERICO ALICE PARCHEN
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico,

à menina de 6 anos, que na esperança de descobrir por que a lua se movia enquanto ela caminhava, pediu ajuda de três amigos. Colocou cada um em um ponto, pediu que ficassem parados, observassem a lua e relatassem se o orbe se movia ou não. Ela caminhou entre os três amigos e viu que a lua se movia para ela, mesmo quando seus amigos falavam que a lua estava parada. A menina não respondeu a sua dúvida imediatamente. Mas sem saber, naquele momento fez seu primeiro experimento científico.

Aos meus pais e irmão, que em nossos sonhos de nos tornamos melhores a cada dia, nunca havíamos sonhado em chegar tão longe. Mas descobrimos que a beleza da vida é lutar por um sonho e logo em seguida, criar outro.

A você, que lê esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que em sua infinita bondade, me propiciou essa grandiosa experiência. Obrigada por sua presença em todos os passos.

Agradeço à minha família, em especial a minha mãe, Dinah, meu irmão Gabriel e meu marido Tobias. Muito obrigada por todo o apoio mental, material e emocional. Obrigada por estarem juntos me motivando e compartilhando as alegrias e tristezas.

Aos professores, Setsuo Iwaki, Rosilani Trianoski e Rodrigo Terezo, por auxiliarem e acompanharem nesse projeto. Muito obrigada por sua orientação.

Ao Senhor Gentil Righez (Righez Madeiras), pelo imenso apoio e doações para a realização dessa pesquisa. Obrigada por acreditar que a pesquisa científica traz prosperidade para a indústria. Agradeço imensamente sua confiança e participação nesse projeto.

A Lamelar - Estruturas em Madeira, agradeço à equipe, Rodrigo, João, Leonardo e Guilherme. Muito obrigada pela colaboração no desenvolvimento dessa tese.

A Leonardo Coelho, bolsista no Laboratório de Materiais e Construção (LABCOM) no CAV-UDESC, pela grande assistência e trabalho para a execução da parte prática desse estudo.

A equipe do Laboratório de Materiais e Construção, Jonathas, Matheus e demais membros. Muito obrigada pelo auxílio durante a execução desse projeto.

Ao professor Alexsandro Cunha, pelo apoio e por ceder o espaço do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira no CAV- UDESC, para a execução de ensaios da madeira.

A Helena Vieira, grande amiga e companheira de estudos científicos.

Agradeço à equipe de servidores do CAV, pelo auxílio dispendido na logística das madeiras e dos painéis.

Aos amigos e colegas do laboratório de painéis na UFPR, obrigada pela colaboração.

À UFPR e ao programa de pós-graduação em Engenharia Florestal, obrigada a todo o trabalho dedicado a formação científica de novos doutores.

À CAPES, agradeço a bolsa de estudos durante todo o tempo de desenvolvimento desse estudo.

A você, que lê essa tese e visa criar um mundo melhor por meio da ciência.

Agradeço a todos e a tantas outras pessoas que, de alguma forma, auxiliaram na execução desse projeto. Sua contribuição não pode ser colocada em ordem de importância, porque todas foram vitais para que essa tese se realizasse. Obrigada por fazerem essa tese se concretizar, ela é tanto minha quanto sua.

“A Humanidade certamente necessita de homens práticos, que obtêm o máximo de seu trabalho e, sem esquecer o bem geral, resguardam seus próprios interesses. Contudo, a humanidade necessita também dos sonhadores, para quem o desenvolvimento desinteressado de um empreendimento é tão cativante que lhes torna impossível cuidar dos seus próprios interesses materiais.” (Marie Curie)

RESUMO

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) é um produto produzido com madeira serrada, capaz de suprir a demanda por produtos de construções sustentáveis com zero emissão de carbono, por isso, sua produção tem aumentado no mundo. Grande parte da MLCC é produzida na Europa e usa madeiras provenientes de lento crescimento. O presente estudo foi executado considerando a capacidade do Sul do Brasil de disponibilizar madeiras de coníferas de rápido crescimento no mercado e à dificuldade de se obter madeiras com qualidade estrutural. A qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. foi avaliada para a produção de MLCC com base na classificação visual e mecânica e a quantidade de lenho juvenil (LJ) e adultos (LA) em três sortimentos (A, B e C) com distintos diâmetros. Inicialmente, avaliou-se as tábuas (n=1056) quanto a sua área de LJ e LA, rigidez à flexão (MOE) e densidade. Definiu-se o rendimento com base nas variáveis citadas nos três sortimentos. Em seguida, correlações e modelos de regressão linear múltipla foram modelados entre as variáveis para estimar a quantidade de área mínima dos LJ e LA presentes em tábuas classificadas como estruturais, de acordo com as classes de resistência das normas brasileira e europeia. Por último, quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4) de painéis MLCC com três camadas foram confeccionados com as tábuas classificadas na primeira parte. Os painéis foram avaliados em tamanho estrutural no teste de flexão não destrutiva para obter o MOE e corpos de prova foram extraídos para avaliar a resistência e rigidez à flexão e compressão paralela ao plano do painel, flexão e compressão perpendicular ao plano e cisalhamento de rolamento. Os resultados indicaram que as tábuas estruturais podem ter a presença de em média 40% de LJ, desde que seja superior a 6 anos de idade. Para obter tábuas com classe estrutural C24 (11.000 MPa), as toras tinham no mínimo de 24 anos, para as tábuas classe C14 (7.000 MPa), o mínimo foi de 18 anos. Os sortimentos de menor diâmetro não proporcionaram grandes quantidades de tábuas com classe acima da C14. O MOE foi a propriedade mais eficiente para classificar as tábuas e painéis pelas normas. O T2 e T3 tiveram os melhores desempenhos, sendo que suas propriedades mecânicas foram iguais ou superiores aos valores declarados por produtores europeus. No geral, os valores das resistências dos painéis foram até 80% maiores aos valores declarados por produtores europeus. O *Pinus taeda* proveniente de sortimentos de maiores diâmetros apresentou potencial para ser enquadrado nas classes de resistência mais altas da norma europeia. Devido ao rápido crescimento da espécie e ao bom desempenho na MLCC observado neste estudo, notou-se uma grande oportunidade para competir no mercado internacional de produtos estruturais.

Palavras-chave: Madeira sólida; Rendimento de serraria; Construção sustentável; Produto estrutural; Edifícios de madeira.

ABSTRACT

Cross Laminated Timber (CLT) is a product fabricated with wooden boards, capable of meeting the demand for sustainable construction products with zero carbon emissions, and therefore, its production has increased worldwide. Much of the CLT is produced in Europe and uses slow-growing wood. This study was carried out considering the capacity of Southern Brazil to provide fast-growing softwoods in the market and the difficulty of obtaining timber with structural quality. The quality of *Pinus taeda* L. wood was assessed for the production of CLT based on visual and mechanical classification, and the amount of juvenile (JW) and adult (AW) wood in three assortments (A, B and C) with different diameters. Initially, the boards (n=1056) were evaluated for their JW and AW area, bending stiffness (MOE) and density. Yield was defined based on the variables mentioned, in the three assortments. Next, correlations and multiple linear regression models were modeled between the variables to estimate the amount of minimum area of the JW and AW present in boards classified as structural, according to the strength classes of the Brazilian and European standards. Finally, four treatments (T1, T2, T3 and T4) of three-layer CLT panels were made with the boards classified in the first part. The panels were evaluated in structural size in the non-destructive bending test to obtain the MOE, and samples were extracted to evaluate the strength and stiffness of bending and compression parallel to the panel plane, bending and compression perpendicular to the plane and rolling shear. The results indicated that the structural boards may have the presence of an average of 40% of JW, as long as they are older than six years of age. To obtain a board class C24 (11,000 MPa), the logs were at least 24 years old, for a board class C14 (7,000 MPa), the minimum was 18 years. The smaller diameter assortments did not provide large quantities of boards with the class above C14. MOE was the most efficient property to classify boards and panels by standards. T2 and T3 had the best performances, and their mechanical properties were equal to or greater than the values declared by European producers. Overall, the strength values of the panels were up to 80% higher than the values declared by European producers. *Pinus taeda* from assortments of larger diameters had the potential to be included in the higher strength classes of the European standard. Due to the fast growth of the species and the good performance in the CLT observed in this study, there was a great opportunity to compete in the international market for structural products.

Keywords: Lumber; Sawmill yield; Sustainable construction; Structural Products; Wooden building.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento em altura e diâmetro de uma árvore, com destaque para a formação de lenho juvenil.....	29
Figura 2 - Posições radiais na área transversal das toras a cada seis anéis cambiais.	59
Figura 3 - Diagramas dos desdobros 1, tangenciando os anéis de crescimento e o desdobro 2 para retirada do bloco central.	61
Figura 4 – Sequência da análise de imagem digital para a determinação de características da tora no programa ImageJ.	64
Figura 5 - Exemplo de fotografia para análise de imagem no software ImageJ.....	65
Figura 6 - Exemplo de uma área transversal delimitada no software ImageJ.	66
Figura 7 – Tábua com largura de 100 mm (a) com um nó fora dos limites aceitos, classificado visualmente com o auxílio de um gabarito (b).....	68
Figura 8 - Área da seção transversal marcada para as medidas dos anéis de crescimento (a) e detalhe do aumento da lupa 10 x (b).	69
Figura 9 - Diagrama do corte das tábuas (a – c) demarcadas em cinco posições para a obtenção dos corpos de prova de flexão destrutiva (b) e densidade (d).....	74
Figura 10 - Configuração de teste de flexão estática com as distâncias entre os pontos de apoio e aplicação de carga relativos à espessura (h), conforme a norma EN 408 (EN, 2012).	76
Figura 11 - Medição do teor de umidade com higrômetro (a), com agulha inserida próxima à ruptura do corpo de prova (b).	77
Figura 12 – Ângulos da grã na área transversal dos corpos de prova em relação ao sentido de aplicação de força no teste de flexão estática.	78
Figura 13 – Quantidade de tábuas com diferentes posições radiais na área transversal em três sortimentos (A, B e C).....	84
Figura 14 – Valores do MOE e quantidade percentual das posições radiais nas tábuas do sortimento A para os pontos limites de 7.000 e 11.000 MPa....	99
Figura 15 - Valores do MOE e quantidade percentual das posições radiais nas tábuas do sortimento B para os pontos limites de 7.000 e 11.000 MPa.	101

Figura 16 - Valores do MOE e quantidade da área em percentual das posições radiais nas tábuas do sortimento C para os pontos limites de 7.000 MPa.	103
Figura 17 – Valores da densidade aparente (12%) para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de <i>Pinus taeda</i> provenientes do Sortimento A.	105
Figura 18 - Valores do MOE para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de <i>Pinus taeda</i> provenientes do Sortimento A.	106
Figura 19 - Valores da densidade aparente (12%) para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de <i>Pinus taeda</i> provenientes do Sortimento B.	109
Figura 20 - Valores do MOE para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de <i>Pinus taeda</i> provenientes do Sortimento B.	111
Figura 21 - Valores da densidade aparente (12%) para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de <i>Pinus taeda</i> provenientes do Sortimento C.	114
Figura 22 - Valores do MOE para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de <i>Pinus taeda</i> provenientes do Sortimento C.	115
Figura 23 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos da densidade ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 para o sortimento A (diâmetro de 430 a 550 mm).	120
Figura 24 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos de módulo de elasticidade MOE_1 , MOE_2 e MOE_3 para o sortimento A (diâmetro de 430 a 550 mm).	122
Figura 25 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos da densidade ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 para o sortimento B (diâmetro de 350 a 450 mm).	125
Figura 26 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos de módulo de elasticidade MOE_1 , MOE_2 e MOE_3 do sortimento B (diâmetro de 350 a 450 mm).	128
Figura 27- Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos da densidade ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 do sortimento C (diâmetro de 250 a 350 mm).	130

Figura 28 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos de módulo de elasticidade MOE_1 , MOE_2 , e MOE_3 , do sortimento C (diâmetro de 250 a 350 mm).	132
Figura 29 – Quantidade de tábuas de <i>Pinus taeda</i> com diferentes posições radiais obtidas de dois desdobros de toras de diâmetro entre 430 e 550 mm. ...	134
Figura 30 - Quantidade de tábuas de <i>Pinus taeda</i> classificadas pelo MOE na EN 338 (EN, 2016) provenientes de dois diagramas de desdobros.	135
Figura 31 - Determinação do ponto limite do lenho juvenil pela densidade aparente.	139
Figura 32 – Ilustração da distribuição das lamelas em um painel MLCC de três camadas.	164
Figura 33 - Edifício <i>Stadhaus</i> , Murray Groove, Londres, com nove andares.	169
Figura 34 - Projeto do complexo residencial Via Cenni, Milão, Itália.	170
Figura 35 - Edifício Mjøstårnet (Noruega) de construção mista de Madeira Lamelada Colada (MLC) e painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC).	171
Figura 36 – Imagem do projeto do edifício escalonado AMATA, Na Vila Madalena, São Paulo Brasil com 13 pavimentos.	171
Figura 37 - Fachada do edifício comercial de 4 pavimentos na rua Faria Lima (lado esq.), com destaque para os pisos em MLCC (lado dir.).	172
Figura 38 - A relação das normas europeias para produção de painéis MLCC.	174
Figura 39 - Esforços que produzem o cisalhamento de rolamento.	195
Figura 40 - Esquema do painel MLCC de três camadas.	199
Figura 41 - Área superficial do painel MLCC com destaque na área de corte do painel para ensaio não destrutivo.	201
Figura 42 - Exemplo corte dos corpos de prova para determinar as propriedades do MLCC em relação à área total da superfície do painel. As áreas de exclusão estão marcadas com X.	202
Figura 43 – Ilustração de corpos de prova extraídos par o teste de flexão paralela (a) e perpendicular (b) ao plano de um painel MLCC.	203
Figura 44 - Configurações para o ensaio não destrutivo à flexão de um painel MLCC para um vão de 1800 mm.	204
Figura 45 - Configuração de ensaio a flexão estática para corpos de prova extraídos de painéis MLCC com vão de 900 mm.	206

Figura 46 - Configuração de ensaio de resistência ao cisalhamento transversal do painel.....	209
Figura 47 - Valores e comparações entre as médias de quatro diferentes tratamentos de painéis MLCC de <i>Pinus taeda</i>	220
Figura 48 - Valores e comparações entre as médias de quatro tratamentos de painéis MLCC de <i>Pinus taeda</i>	222
Figura 49 - Corpo de prova de flexão paralela ao plano do painel rompido por forças de cisalhamento na região entre os pontos de apoio e carregamento da força.	223
Figura 50 - Corpos de prova de compressão paralela ao plano do painel MLCC com diferentes tipos de ruptura.....	225
Figura 51 - Aspecto visual de um corpo de prova de MLCC de três camadas com deformação ocasionada por forças de compressão perpendicular ao plano do painel.....	226
Figura 52 - Corpos de prova de cisalhamento de rolamento ensaiados à flexão de três pontos, com rupturas características de cisalhamento.....	227

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características para a classificação visual com base na norma EN 14081-1 (EN, 2016b) para enquadramento nas classes da EN 338 (EN, 2016a).	46
Tabela 2 – Valores máximos da área ocupada pelo nó na seção transversal conforme a ASTM D245 (ASTM, 2019).	47
Tabela 3 – Densidade da madeira pelo número de anéis de crescimento e a proporção do lenho tardio.	49
Tabela 4 – Valores mínimos de resistência e rigidez à flexão e densidade para a classificação estrutural da madeira de coníferas pela norma europeia EN 338 (EN, 2016a).	51
Tabela 5 - Valores mínimos de densidade, resistência e rigidez à flexão para a classificação estrutural do <i>Pinus</i> spp. pela norma brasileira NBR 7190-2 (ABNT, 2022b).	51
Tabela 6 - Número de toras desdobradas nos sortimentos com seus diâmetros médios e a identificação do diagrama de desdobro.	60
Tabela 7. Número de amostras em cada posição para a o teste destrutivo de flexão estática.	75
Tabela 8 – Valores médios e teste de médias Tukey para o raio, a espessura e a área percentual em cinco posições radiais em três sortimentos obtidos pela análise digital de imagem.	79
Tabela 9 - Rendimento e número de tábuas de 150 mm e 100 mm de largura obtidos em dois desdobros (1 e 2) em três sortimentos (A, B e C) em toras de <i>Pinus taeda</i> .	81
Tabela 10 - Valores médios, mínimos e máximos para densidade aparente a 12% de umidade em três sortimentos de <i>Pinus taeda</i> .	87
Tabela 11 - Classificação do sortimento nas classes de resistência da EN 338 (EN, 2016) e NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b) pela densidade aparente.	88
Tabela 12 – Quantidade de tábuas classificadas nas classes de resistência da EN 338 (EN, 2016a) pela densidade aparente média.	89
Tabela 13 – Quantidade de tábuas classificadas pela NBR 7190 – 2 (ABNT, 2022a) com base na densidade aparente em três sortimentos.	90

Tabela 14 – Valores médios dos lenhos inicial e tardio nos anéis de crescimento em cinco posições radiais.	91
Tabela 15 – Valores médios da quantidade dos lenhos inicial e tardio no anel de crescimento em cinco posições radiais para a madeira de <i>Pinus taeda</i>	92
Tabela 16 – Quantidade de tábuas classificadas nas classes visuais para o Sortimento A.....	94
Tabela 17 – Percentual de tábuas classificadas nas classes visuais para o Sortimento B.....	95
Tabela 18 – Percentual de tábuas classificadas nas classes visuais para o Sortimento C.....	95
Tabela 19 - Classificação das tábuas nas classes de resistência da EN 338 (EN, 2016a) pelo módulo de elasticidade à flexão em três sortimentos de <i>Pinus taeda</i>	97
Tabela 20 - Classificação das tábuas por sortimento nas classes de resistência pela NBR 7190 (ABNT, 2022) pela propriedade do módulo de elasticidade....	98
Tabela 21 - Correlações de Pearson para as variáveis, Posição × MOE e Posição × Densidade aparente para as tábuas do sortimento A.....	108
Tabela 22 - Correlações de Pearson para as variáveis, Posição × MOE e Posição × Densidade aparente para as tábuas do sortimento B.....	113
Tabela 23 - Correlações de Pearson para as variáveis, Posição × MOE e Posição × Densidade aparente para as tábuas do sortimento C.	117
Tabela 24 - Modelos de regressão múltipla linear para a densidade (ρ) em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento A (toras com diâmetro de 430 a 550 mm).....	118
Tabela 25 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente MOE em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento A (diâmetro de 430 a 550 mm).....	121
Tabela 26 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente densidade (ρ) em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento B (diâmetro de 350 a 450 mm).	123
Tabela 27 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente MOE em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento B (diâmetro de 350 a 450 mm).....	126

Tabela 28 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente densidade (ρ) em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento C (diâmetro de 250 a 350 mm).	129
Tabela 29 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente MOE em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento C (diâmetro de 250 a 350 mm).	131
Tabela 30 - Valores do teste z para o número de tábuas dos desdobros A-1 e A-2 classificadas pela norma europeia EN 338 (EN, 2016).	136
Tabela 31 - Valores do teste z para o número de tábuas dos desdobros A-1 e A-2 classificadas pela norma brasileira NBR 7190:2 (ABNT, 2022b).	137
Tabela 32 - Valores médios da densidade aparente obtidos de corpos de prova sem defeitos em cinco posições radiais.	138
Tabela 33 - Valores médios do MOE e MOR à flexão provenientes de ensaios destrutivos de corpos de prova sem defeitos de <i>Pinus taeda</i> para cinco posições radiais.	141
Tabela 34 – ANOVA do teste fatorial para avaliação entre os fatores posição e grã no MOE e no MOR.	143
Tabela 35 - Médias do MOE em relação a inclinação dos anéis.	143
Tabela 36 - Exemplos de edifícios com MLCC e com outros elementos estruturais como MLC ou aço.	168
Tabela 37 - Exemplos de tempo, gramatura e pressão de colagem para adesivos usados na produção do MLCC.	180
Tabela 38 – Exemplos de certificações técnicas (ETA) emitidas para empresas produtoras de MLCC na Europa relacionadas as classes de resistência das lamelas e/ou dos painéis.	184
Tabela 39 - Delineamento experimental dos painéis MLCC com as classes de resistência baseadas na norma europeia EN 338.	200
Tabela 40 - Valores do módulo de elasticidade médio das camadas externa (CE _x) e interna (CI) dos painéis em quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4), determinados pelos ensaios não destrutivos nas tábuas.	211
Tabela 41 - Valores do MOE nos painéis formados por três camadas com a madeira de <i>Pinus taeda</i> e valor médio do MOE nos tratamentos.	213

Tabela 42 - Valores médios e característicos para diferentes propriedades mecânicas obtidas por ensaios destrutivos.	216
--	-----

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMF	Ângulo da microfibrila
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CNC	Comando numérico computadorizado
CE	Certificação europeia
CPR	Regulamento dos Produtos de Construção
C.V	Coeficiente de variação
D	Madeira densa
DoP	Declaração de desempenho do produto
EAD	<i>European Organization for Technical Assessment</i>
EN	<i>European Standard</i>
EOTA	Organização Europeia de Avaliação Técnica
ETA	<i>European Technical Approvals</i>
LA	Lenho adulto
LJ	Lenho juvenil
LI	Lenho inicial / primaveril
LT	Lenho tardio / outonal
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
MLC	Madeira lamelada colada
MLCC	Madeira lamelada colada cruzada
MOE	Módulo de elasticidade à flexão
MOR	Resistência à flexão
ND	Madeira não densa
NP	Norma portuguesa
NS	Não estrutural
P _{,1}	Lenho compreendendo os anéis cambiais de 0 a 6 anos
P _{,2}	Lenho compreendendo os anéis cambiais de 6,1 a 12 anos
P _{,3}	Lenho compreendendo os anéis cambiais de 12,1 a 18 anos
P _{,4}	Lenho compreendendo os anéis cambiais de 18,1 a 24 anos
P _{,5}	Lenho compreendendo os anéis cambiais acima de 24,1 anos
SE	Classe visual especial

SFH	Serra fita horizontal
SFV	Serra fita vertical
SPIB	<i>Southern Pine Inspection Bureau</i>
S1	Classe visual de primeira categoria
S2	Classe visual de segunda categoria
S3	Classe visual de terceira categoria

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Distância entre o suporte e o ponto de aplicação do carregamento
b	Largura do corpo de prova
d_{40}	Deslocamento correspondente a um carregamento de 40% do carregamento total
d_{10}	Deslocamento correspondente a um carregamento de 10% do carregamento total
Dx	Deslocamento médio da tábua
$E_{c,0}$	Rigidez a compressão paralela ao plano do painel
E_{90}	Módulo de elasticidade perpendicular ao plano do painel
f_{40}	Carregamento a 40% do carregamento total
F	Força de carregamento aplicada no meio do vão
f_{10}	Carregamento a 10% do carregamento total
$f_{c,0}$	Resistência a compressão paralela ao plano do painel
$f_{c,0,k}$	Resistência característica a compressão paralela ao eixo longitudinal do painel
$f_{c,90}$	Resistência a compressão perpendicular ao eixo longitudinal do painel
$f_{c,90,k}$	Resistência característica a compressão perpendicular ao eixo do painel
F_{max}	Carregamento máximo aplicado nos corpos de prova
f_m	Resistência à flexão
$f_{m,90}$	Resistência à flexão perpendicular ao plano do painel
$F_{m,k}$	Resistência a flexão paralela às fibras
$F_{t,0,k}$	Resistência a tração paralela a grã
$F_{t,90,k}$	Resistência a tração perpendicular a grã
$F_{v,k}$	Resistência ao cisalhamento paralelo a grã.
$f_{v,0}$	Cisalhamento de rolamento no plano longitudinal do painel
G_m	Módulo de cisalhamento paralelo as fibras médio
h	Espessura do corpo de prova
k	Valor característico
I	Momento de inércia da tábua em mm ⁴
l	Comprimento do vão entre os apoios (mm)

n	Número de amostras
ρ	Densidade
ρ_m	Densidade aparente média
ρ_{05}	Densidade aparente características pela EN 338 (2016)
ρ_{12}	Densidade aparente a 12% de umidade
s	Desvio padrão da amostra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
	CAPÍTULO 1 – QUALIDADE DA MADEIRA DE <i>PINUS</i>	21
2	REVISÃO DE LITERATURA DA QUALIDADE DA MADEIRA	21
2.1	A MADEIRA.....	21
2.2	A FORMAÇÃO E O CRESCIMENTO DA MADEIRA DE CONÍFERAS.....	22
2.3	A MADEIRA DE <i>PINUS</i> NO BRASIL.....	23
2.4	CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA DEVIDO AO CRESCIMENTO	24
2.4.1	Constituição anatômica	24
2.4.2	Lenho inicial, lenho tardio e anéis de crescimento	25
2.4.3	Lenhos juvenil, adulto e de transição	27
2.4.4	Grã	32
2.5	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA	34
2.5.1	Teor de umidade	34
2.5.2	Densidade	36
2.6	PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA	38
2.6.1	Módulo de elasticidade.....	39
2.6.2	Módulo de ruptura	42
2.7	CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA	44
2.7.1	Classificação visual dos nós.....	45
2.7.2	Classificação visual dos anéis de crescimento.....	48
2.8	CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DE TÁBUAS.....	49
2.9	CLASSES DE RESISTÊNCIA DA NORMA EUROPEIA	50
2.10	CLASSES DE RESISTÊNCIA PELA NORMA BRASILEIRA.....	51
2.11	AVALIAÇÃO DA MADEIRA POR PROCESSAMENTO DE IMAGEM	52
2.12	DESDOBRO E RENDIMENTO DO <i>Pinus taeda</i>	53
2.13	MÉTODOS DE ANÁLISE PARA DEMARCAÇÃO DOS LENHOS	55
2.14	MÉTODO LIMIAR.....	56
3	MATERIAL E MÉTODOS DA QUALIDADE DA MADEIRA	58

3.1	PREPARAÇÃO DO MATERIAL	58
3.2	MENSURAÇÃO DAS DIMENSÕES DAS TÁBUAS	62
3.3	RENDIMENTO	62
3.4	ANÁLISE POR IMAGEM DA ÁREA TRANSVERSAL DAS TORAS	63
3.5	QUALIDADE DAS TÁBUAS	65
3.5.1	Determinação da área de lenho em relação à área transversal total nas tábuas.....	65
3.5.2	Densidade aparente das tábuas estruturais	66
3.5.3	Classificação visual das tábuas.....	67
3.5.4	Anéis de crescimento na área transversal.....	68
3.5.5	Classificação mecânica das tábuas	70
3.6	CLASSIFICAÇÃO NAS NORMAS EUROPEIA E BRASILEIRA PARA MADEIRA ESTRUTURAL.....	71
3.7	CORRELAÇÕES	71
3.8	MODELOS MÚLTIPLOS LINEARES.....	72
3.9	INFLUÊNCIA DO DESDOBRO NA CLASSIFICAÇÃO DAS TÁBUAS	73
3.10	QUALIDADE DOS LENHOS NO ENSAIO DESTRUTIVO	74
3.10.1	Ensaio destrutivo a flexão	74
3.10.2	Determinação da inclinação da grã na área transversal.....	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO DA QUALIDADE DA MADEIRA	79
4.1	ANÁLISE POR IMAGEM DIGITAL DA ÁREA TRANSVERSAL DA TORA	79
4.2	RENDIMENTO GERAL	81
4.3	QUALIDADE DAS TÁBUAS	83
4.3.1	Análise da área transversal das tábuas por imagem.....	83
4.3.2	Densidade aparente	87
4.3.3	Análise dos anéis de crescimento da área transversal das tábuas	90
4.3.4	Classificação visual das tábuas.....	94
4.3.5	Módulo de elasticidade.....	96
4.4	DETERMINAÇÃO DA ZONA JUVENIL PELO MÉTODO LIMIAR	99
4.5	DETERMINAÇÃO DA ZONA JUVENIL POR CORRELAÇÕES	104
4.6	MODELOS MÚLTIPLOS LINEARES.....	118
4.7	INFLUÊNCIA DO DESDOBRO NA QUALIDADE.....	133
4.7.1	Quantidade de tábuas com lenho juvenil e lenho adulto provenientes de dois desdobros	133

4.7.2	Classificação das tábuas nas normas brasileira e europeia	135
4.8	ENSAIOS DESTRUTIVOS COM CORPOS DE PROVA SEM DEFEITOS ..	137
4.8.1	Densidade aparente	137
4.8.2	Módulo de elasticidade e resistência à flexão	140
4.8.3	Interação entre grã e posições	142
5	CONCLUSÕES DA QUALIDADE DA MADEIRA	145
	REFERÊNCIAS	147
	CAPÍTULO 2 – PAINEL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA	164
6	REVISÃO DE LITERATURA DOS PAINÉIS MLCC	164
6.1	PAINEL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA	164
6.2	VANTAGENS DO MLCC	165
6.3	HISTÓRICO MUNDIAL DOS PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA	166
6.4	EXEMPLOS DE USO EM CONSTRUÇÕES	168
6.5	PROCEDIMENTOS PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS MLCC	172
6.6	PARÂMETROS QUE AFETAM A QUALIDADE DA MLCC	174
6.6.1	Variáveis inerentes à madeira	175
6.6.2	Variáveis inerentes à produção	178
6.7	REGULAMENTAÇÕES E NORMAS ATUAIS	181
6.7.1	NBR 7190	181
6.7.2	EN 16351	181
6.7.3	European Assessment Document e European Technical Approval	183
6.7.4	Avaliação da qualidade de MLCC pelo EAD	184
6.8	SITUAÇÃO ATUAL PARA A CIÊNCIA E INDÚSTRIA	186
6.9	PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DO MLCC	188
6.10	RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA FLEXÃO	189
6.11	RESISTÊNCIA E RIGIDEZ À COMPRESSÃO	191
6.12	CISALHAMENTO DE ROLAMENTO	194
7	MATERIAL E MÉTODOS DOS PAINÉIS MLCC	198
7.1	PREPARO DAS LAMELAS	198
7.2	DELINEAMENTO DOS TRATAMENTOS	199
7.3	MONTAGEM E COLAGEM DOS PAINÉIS	200
7.4	ADEQUAÇÃO DOS PAINÉIS PARA TESTE	201
7.5	CORPOS DE PROVA PARA OS TESTES DE RESISTÊNCIA	201

7.6	TESTE NÃO DESTRUTIVO DOS PAINÉIS	204
7.7	CONFIGURAÇÕES PARA OS TESTES DESTRUTIVOS.....	206
7.8	ESTATÍSTICA	210
8	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS PAINÉIS MLCC.....	211
8.1	MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS PAINÉIS	211
8.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ENSAIOS DESTRUTIVOS.....	215
8.3	TIPOS DE RUPTURAS	223
9	CONCLUSÕES DOS PAINÉIS MLCC.....	228
10	CONCLUSÕES GERAIS	229
	REFERÊNCIAS.....	231
	APÊNDICE 1 – DIAGRAMA DAS ETAPAS EXECUTADAS NOS MATERIAIS E MÉTODOS	242
	APÊNDICE 2 – VALORES MÉDIOS DO MOE EM CINCO POSIÇÕES RADIAIS PARA OBTENÇÃO DOS LIMITES PELO MÉTODO LIMAR	243
	APÊNDICE 3 – RESULTADOS DAS ANOVAS PARA OS MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR AJUSTADOS PARA A DENSIDADE E MOE.	245
	APÊNDICE 4 - RESULTADOS ANOVA FLEXÃO DESTRUTIVA.....	253
	APÊNDICE 5 – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS PAINÉIS MLCC DE TRÊS CAMADAS.	254
	APÊNDICE 6. MOE DAS LAMELAS DOS PAINÉIS CLT	256

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, se intensificou a procura por materiais de construção que aliem a sustentabilidade, qualidade e que não limitem o estilo de vida do homem. Atualmente, os materiais de construção mais populares necessitam de uma grande quantidade de energia para serem fabricados e essa energia está relacionada com a liberação de CO₂ para a atmosfera. No entanto, a madeira é um dos poucos materiais construtivos cujo balanço de liberação de carbono no ar é negativo.

Como material natural, a madeira apresenta o carbono como um dos principais componentes para o seu crescimento. De acordo com Brito e Barichello (1981), cerca de 49 a 50% da composição elementar da madeira é carbono. A absorção do carbono da atmosfera ocorre no processo de fotossíntese, que converte o dióxido de carbono e água em açúcares para o crescimento das árvores e libera oxigênio na atmosfera. Segundo estimativas (FPL, 2010), uma quantidade substancial de carbono pode ser sequestrada pelas árvores, cerca de 26 bilhões de toneladas métricas por ano.

De acordo com um estudo realizado na Europa, Ruuska (2013) afirma que ao usar painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) na construção, se absorve aproximadamente 1,611 kg/kg de CO₂. Portanto, o painel MLCC é um material com capacidade de absorver pelo menos 150% de carbono em relação ao seu peso. Isso ocorre devido ao crescimento da madeira e ao seu processamento em um produto engenheirado que utiliza menos energia e gera menos resíduos. Além do mais, em uma construção, os painéis MLCC podem substituir o aço e/ou concreto, sendo esses dois materiais responsáveis por altas taxas de emissões de CO₂.

Desse modo, ao utilizar a madeira na construção civil em formas que mantenham esse material puro e por um longo período, auxilia na diminuição da concentração de CO₂ na atmosfera. Ademais, a melhor eficiência energética de edifícios de madeira gera um menor consumo de energia ao longo da vida da construção, causando menores emissões ao longo do tempo (LUIZ, 2013).

Considerando o desafio de mitigar os efeitos do aquecimento global, o Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP – *United Nations Environment Programme*), afirma que o setor de construção consome

aproximadamente 30% de toda a energia global, sendo responsável por aproximadamente 27% das emissões de carbono mundial. No entanto, para que o setor esteja alinhado com o Acordo de Paris, assinado por 196 nações, ele deve se tornar emissor zero-carbono líquido até 2050, isso significa que as emissões precisariam reduzir 98% em relação aos níveis de 2020 (UNEP, 2022).

Perante esta realidade, o painel MLCC aparece como um material de construção para mitigar a liberação de CO₂ na atmosfera e apresenta técnica viável para o aproveitamento racional da madeira. A versatilidade do MLCC com respeito às formas, dimensões e resistência dos elementos estruturais, aliada ao aumento da durabilidade proporcionado pelo tratamento preservativo, vem ampliando sua produção e uso em diversos países.

Na Europa, desde 1996 até 2008, houve um crescimento de 860% na produção de MLCC e ele já é o segundo produto beneficiado de madeira mais importante do mercado Europeu. A produção de MLCC na Europa em 2014 foi de 600.000 m³ e, de acordo com Plackner (2015), tem potencial para atingir 3 milhões de m³ nos próximos anos.

Com o crescimento da fabricação e uso do MLCC no mercado europeu cria-se a demanda por madeira sólida e por painéis pré-fabricados. A principal espécie utilizada na Europa para a produção de MLCC é o *norway spruce* (*Picea abies* (L.) H. Karst.), cuja classificação pela EN 338 (EN, 2016a) varia de C16 a C30. Contudo, no mundo todo, existe a produção de MLCC de espécies alternativas (BRANDNER *et al.*, 2016).

No Brasil, estudos já foram iniciados para analisar a viabilidade de painéis feitos de *Pinus* spp.. Porém, devido à alta taxa de crescimento das florestas brasileiras, o comportamento mecânico da madeira de *Pinus* difere das madeiras europeias. Em avaliações do módulo de elasticidade longitudinal à flexão (MOE) de tábuas de *Pinus* spp., alguns autores obtiveram resultados inferiores a 8.000 MPa (BALLARIN; NOGUEIRA, 2005; STARGERLIN *et al.*, 2008; CUNHA; MATOS, 2010), indicando que parte dessa madeira seria classificada como não estrutural pela EN 338 (EN, 2016). Portanto, os painéis fabricados com essa matéria-prima não atenderiam os requisitos exigidos pela *European Organization for Technical Assessment* - EAD 130005-00-0304 (EOTA, 2015) para utilização e comercialização em painéis MLCC.

Espécies com propriedades mecânicas menores que o *norway spruce* podem ser utilizadas, desde que as propriedades finais do MLCC apresentem os valores mínimos requisitados pelo EAD 130005-00-0304 (EOTA, 2015). Isso pode ser alcançado devido à composição sólida e pela homogeneização das propriedades das tábuas no painel (BRANDNER *et al.*, 2016).

No entanto, a matéria-prima destinada à fabricação de painéis MLCC apresenta grande variabilidade. Normalmente, o manejo das florestas plantadas visa alto rendimento em volume e nem sempre a qualidade da madeira para uso na construção civil é utilizada como base para os estudos de melhoramento (CLARK; DANIELS; JORDAN, 2006). Como resultado, existe uma grande proporção de lenho juvenil nas toras de madeira. Aliando a alta proporção de lenho juvenil com o desdobro de tábuas de elevada espessura, tem-se uma grande área de lenho juvenil nas tábuas, compelindo a uma baixa rigidez.

Todavia, a qualidade da madeira serrada pode ser influenciada por diversos fatores como: sortimentos de toras com diferentes diâmetros, diferentes diagramas de desdobro e técnicas de classificação da madeira. Ao se trabalhar com esses fatores conjuntamente pode-se aprimorar a quantidade de madeira classificada para uso estrutural para não comprometer a qualidade do produto engenheirado de madeira, como o MLCC.

Com relação ao diâmetro das toras, em média quanto menor o diâmetro, maior será a quantidade de lenho juvenil presente na tora, conseqüentemente menores propriedades mecânicas serão alcançadas. O diagrama de desdobro pode auxiliar no corte de tábuas com maior ou menor área de lenho juvenil. Já as classificações não destrutivas da madeira são importantes para homogeneizar e segregar os lotes, permitindo que cada tábua seja disposta na condição de melhor serviço, de acordo com suas características.

Todos esses parâmetros quando combinados podem impactar na produção, qualidade e custo da cadeia de produção dos painéis MLCC. Assim, existe a necessidade de conhecer melhor os parâmetros existentes entre a qualidade e a produção dessa madeira para obter painéis que atendam aos requisitos mínimos do mercado. Com base nisso, este estudo objetivou verificar a qualidade da espécie de *Pinus taeda* para a produção de painéis de MLCC.

1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por materiais de construção com zero-emissão de carbono se tornou imperativa no mundo. Para seguir as premissas do Acordo de Paris, o setor de construção civil deverá passar a ter projetos que visem emissões de carbono nulas. Para tanto, materiais como painéis MLCC deverão ser considerados em grande escala pelo setor. Por conta disso, um alto potencial de crescimento e consumo de MLCC foi estimado para os próximos anos. Por ser um painel relativamente novo no mercado, estudos estão sendo realizados para compreender as melhores formas de manufatura do material ao nível mundial. No Brasil, as pesquisas com MLCC ainda são incipientes, e não há informações específicas sobre o uso da madeira de reflorestamento com alta taxa de crescimento para a utilização na produção deste produto.

Desta forma, o estudo de painéis manufaturados com matéria-prima proveniente de plantios com alta taxa de crescimento, irá auxiliar na melhor compreensão da fabricação de MLCC. Ao obter a melhor relação entre as propriedades mecânicas e o melhor aproveitamento da matéria-prima para a fabricação do painel, se atende à necessidade das indústrias de madeira que estão começando a manufatura de MLCC no país. Ao fabricar um produto que apresente aumento significativo de resistência com o menor investimento possível, se propicia uma maior competição das empresas no mercado nacional/internacional. Além de incentivar o uso da madeira como material no setor da construção civil, pelo uso de produtos sustentáveis; agregar maior valor à matéria-prima; incentivar a indústria, a criação de novos reflorestamentos, novos postos de trabalho e maior geração de renda; e motivar mais estudos sobre a cadeia de produção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo geral*

Avaliar a qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. para produção de painéis de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) para uso estrutural.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Limitar o raio médio de lenho juvenil presente nas toras de madeira de *Pinus* por meio da análise digital de imagem;
- b) Definir o volume de madeira para o uso estrutural obtida de dois desdobros, conforme a classificação mecânica e visual nas tábuas;
- c) Analisar a classificação das tábuas de *Pinus taeda* nas classes estruturais definidas pelas normas brasileira e europeia;
- d) Identificar a idade cambial da árvore em que a madeira passa a ter os valores mínimos para ser destinada ao uso estrutural, por meio das propriedades de densidade e módulo de elasticidade à flexão;
- e) Avaliar painéis MLCC confeccionados com diferentes classes estruturais determinadas pelas normas brasileira e europeia. A avaliação será realizada pelo desempenho dos ensaios de:
 - Módulo de elasticidade à flexão (MOE) perpendicular ao plano do painel em dimensões estruturais de forma não destrutiva;
 - Resistência e módulo de flexão paralela e perpendicular, compressão paralela e perpendicular e cisalhamento de rolamento de corpos de prova extraídos do painel;
- f) Analisar os resultados da classificação do *Pinus taeda* com base nas normas europeia e brasileira;
- g) Averiguar se os painéis MLCC de *Pinus taeda* apresentam propriedades mecânicas suficientes para serem ofertados no mercado internacional.

CAPÍTULO 1 – QUALIDADE DA MADEIRA DE *PINUS*

2 REVISÃO DE LITERATURA DA QUALIDADE DA MADEIRA

Neste tópico serão abordados os conceitos e avanços científicos conhecidos sobre a madeira de coníferas, em especial de *Pinus taeda* de rápido crescimento cultivados no Brasil, com ênfase na madeira para uso estrutural.

2.1 A MADEIRA

A madeira é um material natural, heterogêneo e sua constituição química é basicamente feita de carbono. A madeira, em si, é formada em plantas lenhosas de gimnospermas (coníferas) e angiospermas (dicotiledôneas). Seu crescimento acontece em altura (crescimento primário) e em diâmetro do tronco (crescimento secundário).

A madeira é formada pela casca, tecido mais externo, composto de células mortas e atua como proteção dos tecidos vivos e limita a perda de água por evaporação. Mais internamente, há o floema que conduz seiva elaborada da copa ou para partes em crescimento da planta. O câmbio, uma camada entre a casca e a madeira, é responsável pela formação de novas células para os tecidos do floema e do xilema, fazendo com que ocorra o crescimento em diâmetro. Em seguida, há o tecido lenhoso, conhecido propriamente como madeira, esse tecido é chamado de xilema. O xilema é formado por duas partes: cerne e alburno, e em algumas madeiras é possível reconhecer e diferenciar essas partes pela cor. O alburno, também conhecido como lenho funcional, é responsável pela condução de seiva bruta das raízes à copa, mas também estoca e sintetiza bioquímicos. Quando as células do alburno morrem, originam o cerne, esse lenho não funcional é formado por células sem atividade fisiológica. Por último, na parte central do tronco, existe uma estrutura denominada medula, essa estrutura é um remanescente dos primeiros estágios de crescimento do tronco, antes de a madeira ser formada e pode armazenar algumas substâncias nutritivas, variar em tamanho, forma e cor conforme a espécie (BURGER; RICHTER, 1991; FRANCO, 2013; FLP, 2010).

2.2 A FORMAÇÃO E O CRESCIMENTO DA MADEIRA DE CONÍFERAS

Na botânica as coníferas são definidas como o grupo das Gimnospermas, cujas folhas normalmente possuem formato de agulha. As coníferas datam do período Carbonífero, cerca de 300 milhões de anos. Grande parte das famílias atuais se desenvolveram durante o final do período Triássico e início do Jurássico, sendo predominante nas regiões frias do Hemisfério Norte. No Hemisfério Sul, as famílias que se desenvolveram naturalmente foram as Araucariaceae, Podocarpaceae e Cupressaceae (JUDD *et al.*, 2009). Contudo, no Hemisfério Sul, há a presença de muitas outras espécies, porque estas foram introduzidas ao longo dos anos para uso comercial, como o gênero *Pinus*.

A estrutura anatômica das coníferas é mais simples que a das folhosas (Angiospermas), uma vez que as coníferas possuem na maior parte da constituição da madeira dois tipos de células e relativamente pouca variação na estrutura entre elas.

A constituição anatômica das coníferas é considerada mais primitiva e apresenta elementos celulares mais simples. De acordo com Burger e Richter (1991) a madeira das coníferas é constituída predominantemente por células chamadas de traqueoides axiais e podem representar até 95% de todo o tecido da madeira. Após sua formação, estes elementos apresentam uma longevidade muito curta e rapidamente se tornam tubos ocos com paredes lignificadas que auxiliam na condução e sustentação do lenho. Estas células são consideradas correlacionadas com a resistência da madeira (LARSON *et al.*, 2001), visto que seus comprimentos variam de dois a 11 mm conforme a espécie.

Basicamente, o que distingue as coníferas das folhosas é que esta última possui um elemento celular conhecido como elemento de vaso ou poro, sendo que este, não é encontrado nas coníferas. Como similaridade entre os dois grupos, há o fato que as células morrem na maturidade e algumas dessas células estão dentro do alburno. As únicas células que estão vivas na maturidade são chamadas de parênquimas e podem ser encontradas tanto em coníferas quando em folhosas (FLP, 2010).

O crescimento das coníferas varia devido aos fatores espécie, sítio, condições climáticas e gerenciamento silvicultural, como, por exemplo, espaçamento, fertilizações e desbastes.

No Hemisfério Norte, o crescimento médio das florestas é de cinco $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, mas pode variar de dois a 10 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ conforme a região (VERKERK *et al.*, 2015; POLLET *et al.*, 2017). No Hemisfério Sul, especificamente no Brasil, o crescimento de 30 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ é obtido nas coníferas plantadas para uso comercial, como o *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda* (SHIMIZU, 2008; IBA, 2020). Dessa forma, as espécies de coníferas plantadas no Hemisfério Sul e por consequência no Brasil são uma importante fonte de estoque e suprimento para toda a cadeia de produtos à base de madeira.

2.3 A MADEIRA DE *PINUS* NO BRASIL

O gênero *Pinus* constitui um grupo de aproximadamente 90 espécies de árvores da família Pinaceae (MARCHIORI, 1996). Muitas espécies são intensivamente plantadas e manejadas para produção comercial de madeira, especialmente em países do Hemisfério Sul. No Brasil, em 1948, o Serviço Florestal do Estado de São Paulo introduziu as espécies americanas, como o *Pinus palustris*, *Pinus echinata*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* (SHIMIZU, 2008).

O *Pinus taeda* é uma espécie pertencente ao gênero *Pinus*, que compõe a segunda maior área plantada no Brasil, perdendo para o *Eucalyptus spp.*. O relatório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (IBGE, 2019), indicou que a área total existente de *Pinus* no ano de 2019 foi de aproximadamente 1,9 milhões de hectares e cerca de 28,9% da produção foi destinada à indústria de madeira serrada e seus produtos derivados.

No novo relatório do IBGE (IBGE, 2021), com base na produção de 2020, a área plantada de *Pinus* foi de 1,8 milhões de hectares. O relatório ainda abordou que a produção de toras para madeira serrada e para painéis foi de 26,5%, sendo o terceiro produto mais consumido no setor florestal. Esse valor foi 28,6% maior que em 2020, indicando um aumento da demanda por madeira serrada e painéis. Na exportação, o volume de madeira serrada de *Pinus*, atingiu o patamar de três milhões de m^3 , sendo considerado um valor inédito, conforme o relatório emitido pelo IBA (IBA, 2021).

Com relação à sua anatomia, a espécie apresenta uma constituição de elementos simples. O comprimento médio dos traqueóides na espécie de *Pinus taeda* varia conforme sua idade e posição radial (ZOBEL; SPRAGUE, 1998). Contudo, entre vários estudos, pode-se observar um comprimento médio de 3,11 μm , caracterizando uma espécie de traqueóides longos. Como exemplos, cita-se Klock *et al.* (2002), cujo comprimento dos traqueóides no lenho inicial e tardio foram de 2,93 e 2,98 μm , respectivamente, em *Pinus taeda* com 11 anos. O *Pinus taeda* com 21 anos apresentou um comprimento médio de 3,5 μm (VIVIAN *et al.*, 2015) e com 37 anos o comprimento médio foi de 4,75 μm (BALLARIN; PALMA, 2003). Essa tendência de aumento do comprimento do traqueóide com o avanço da idade no *Pinus taeda* foi observada por Souza e Giovanini (2007), em que as idades de nove, 13 e 20 anos tiveram comprimentos médios de 2,55, 3,11 e 3,5 μm , respectivamente.

O comprimento dos traqueóides é um dos parâmetros mais usados para definir a região de transição entre os lenhos durante a fase de crescimento, contudo, a propriedade pode variar entre espécies (ZOBEL; SPRAGUE, 1998). Embora exista uma variação, há um consenso sobre a tendência de crescimento do comprimento dos traqueóides no sentido radial medula-casca, como mencionado acima.

Esse crescimento é refletido no incremento anual de 30 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ (IBÁ, 2019), sendo que nos primeiros anos os incrementos são mais pronunciados, tendendo a estabilizar com o passar dos anos.

Em geral, devido ao rápido crescimento, as árvores de *Pinus taeda* produzem porções significativas de madeira juvenil. Sua presença corresponde aos primeiros anéis de crescimento após a medula ao longo do fuste e dificulta o uso como madeira sólida, especialmente quando se cogita processar a matéria-prima produzida nos primeiros desbastes (SHIMIZU, 2008).

2.4 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA DEVIDO AO CRESCIMENTO

2.4.1 Constituição anatômica

A constituição anatômica da madeira pode explicar, em parte, as variações de comportamentos da madeira. Seja sua relação com as

propriedades físicas, tais como densidade, inchamento e contração, como nas propriedades mecânicas da madeira. Além de poder influenciar diretamente em todas as etapas do processamento da madeira, como a secagem e a colagem.

A constituição anatômica pode ser diferente conforme o tipo de tecido, (formado por um conjunto de células). Essas diferenças podem ser ocasionadas pelo período de crescimento da planta ou pela época de atividade fisiológica que alteram a formação das células. A variação fisiológica varia com a idade, estação (verão/inverno), clima e condições ambientais e é a principal causa das variações na árvore, que incluem as variações axial, radial e intra-anéis (KOUBAA *et al.*, 2002). Estas variações no anel são conhecidas como lenho inicial e tardio e que juntos formam os anéis de crescimento.

2.4.2 Lenho inicial, lenho tardio e anéis de crescimento

A formação dos lenhos inicial e tardio ocorre da seguinte forma: em períodos após a dormência, as plantas apresentam maior atividade fisiológica, tendo como resultado um rápido crescimento que dá origem ao lenho inicial. Os traqueóides desse lenho apresentam uma parede celular menos espessa, um maior diâmetro e um menor comprimento da célula, resultando em uma coloração clara. Com a aproximação do fim do período vegetativo, as células vão diminuindo gradativamente sua atividade fisiológica, dando origem ao lenho tardio. Os traqueóides que compõem o lenho tardio apresentam uma parede celular mais espessa, menor lúmen, menor diâmetro da célula e maior comprimento, resultando em uma coloração mais escura (BURGER; RICHTER, 1991; ZOBEL; SPRAGUE, 1998).

Essa atividade fisiológica foi explicada por Larson *et al.* (2001). Os autores descrevem que nas épocas em que o ambiente é propício ao crescimento, com calor e umidade disponível, a planta começa a produzir o hormônio de crescimento para ocorrer a expansão radial do tronco e da gema apical na altura. Os autores ainda explicam que o espessamento celular é regulado por processos fotossintéticos que ocorrem nos órgãos da folhagem da copa. Por isso, no momento do início do crescimento, os fotossintéticos produzidos pelas acículas mais antigas são predominantemente usados no crescimento dos brotos e para alongar as acículas. Assim, há pouco

fotossintético disponível para a formação da parede celular da madeira que está em rápida formação/crescimento (lenho inicial). Quando as acículas novas se tornam maduras e iniciam a produção de fotossintéticos, há quantidade suficiente dessas substâncias para ocorrer uma maior transferência para a formação das paredes celulares que ficam mais espessas (lenho tardio).

Os autores ainda comentaram que durante o crescimento juvenil, a expansão celular radial e o espessamento da parede ocorrem independentemente um do outro, pois eles são regulados por diferentes processos fotossintéticos que atuam independentemente nas características das células. Ou seja, durante essa fase, as células podem apresentar tanto grande lúmen quanto maior espessamento celular ou os dois simultaneamente. Isso ocasiona uma região em que ora as células parecem-se com lenho inicial ora com lenho tardio, esse tipo de célula aparece em árvores jovens e com um crescimento vigoroso.

Assim, conforme as condições climáticas, poderá haver maior ou menor interferência no crescimento em diâmetro do tronco. Essas diferenças podem ser observadas nos anéis de crescimento que são formados pelos lenhos inicial (primaveril) e tardio (estival).

Um anel de crescimento pode apresentar uma maior ou menor razão entre o lenho inicial e o tardio. A maior razão ocorre em períodos de alto crescimento quando a formação de lenho inicial é maior do que o tardio. Já a menor razão, acontece quando a quantidade de lenho inicial é similar à do lenho tardio. Como o lenho inicial é formado por células com maior lúmen e menor espessura da parede celular, este apresenta menor densidade em relação ao lenho tardio (LARSON *et al.*, 2001; POLLET *et al.*, 2017). Adicionalmente, devido às diferentes zonas de maior ou menor razão entre os lenhos inicial e tardio, ocorrem variações da densidade no sentido radial da madeira. Essa variação é amplamente estudada para compreender o perfil da densidade, propriedades mecânicas e entender as influências nos lenhos juvenil e adulto (ZOBEL; SPRAGUE, 1998; KOUBAA *et al.*, 2002).

Os anéis de crescimento estão intimamente correlacionados com a densidade da madeira, e conseqüentemente com outras propriedades físicas e mecânicas (BURGUER; RICHTER, 1991; POLLET *et al.*, 2017).

Em um estudo para verificar a influência da largura dos anéis de crescimento no lenho juvenil e adulto, Pollet *et al.* (2017) concluíram que anéis de crescimento com mais de seis mm de largura, não são adequados para usos como madeira estrutural. Os autores ainda reafirmaram que a largura dos anéis de crescimento está intimamente ligada à densidade. Menores larguras dos anéis de crescimento corresponderiam a uma maior densidade, e isto consequentemente, afetaria nas propriedades mecânicas como a rigidez e resistência à flexão.

2.4.3 Lenhos juvenil, adulto e de transição

A formação do lenho juvenil ocorre nos primeiros anos de crescimento de todas as árvores, folhosas e coníferas, mas a diferença entre o lenho juvenil e o lenho adulto tendem a ser mais pronunciadas nas coníferas, especialmente nos *Pinus* (VIDAURRE *et al.*, 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012). O lenho juvenil é definido como a zona de madeira que se estende para fora da medula, onde as características da madeira sofrem mudanças rápidas e sucessivas, com o aumento da deposição das células que formam os anéis de crescimento (LARSON *et al.*, 2001).

Até o momento não existe um consenso no meio científico sobre quais fatores implicam na formação e término do crescimento da zona juvenil, para então iniciar o crescimento da zona adulta (ZOBEL; SPRAGUE, 1998). Alguns autores afirmam que isso ocorre devido à influência da auxina no meristema apical (LARSON *et al.*, 2001; POWER *et al.*, 2016), outros afirmam ser devido à idade do câmbio (JANKOWSKY, 1979; CLARK; DANIELS; JORDAN, 2006) e mais recentemente, já se considerou também, a possibilidade de ser um fator genético (POLLET *et al.*, 2017; DONNELLY; LUNDQUIST; O'REILLY, 2017).

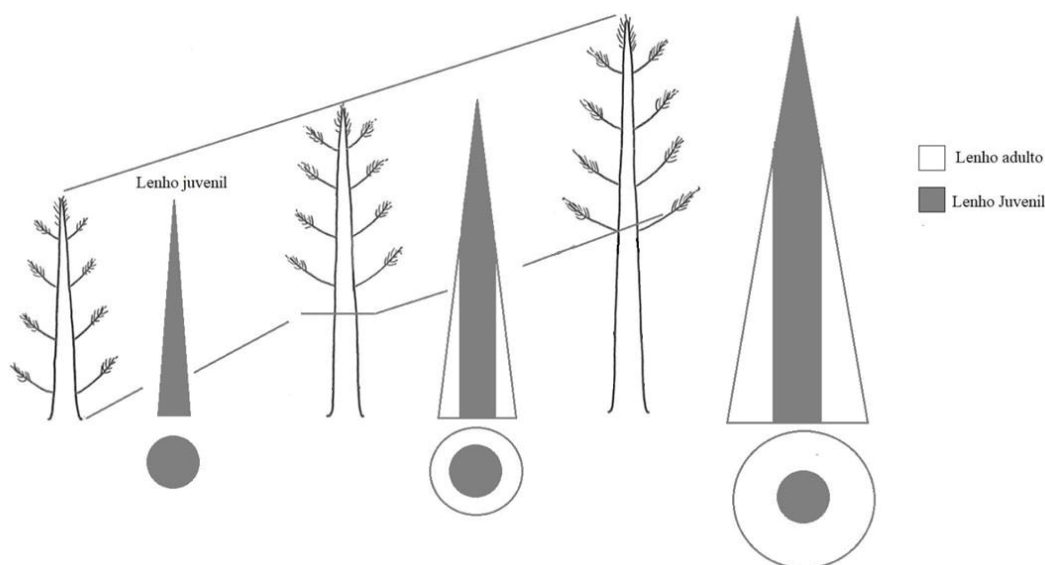
Contudo, o meio científico concorda que o lenho juvenil é formado nos primeiros anos de crescimento da árvore em relação à medula. Em seguida, passa por um período de transição, para finalmente iniciar a formação de lenho adulto. Além disso, reconhece-se que o crescimento e consequentemente as propriedades físico-mecânicas desses lenhos são influenciadas por fatores externos, *e.g.*, condições de crescimento no sítio, localização do povoamento

florestal, práticas silviculturais como densidade do povoamento, fertilização, desbastes (BUTLER *et al.*, 2016; DAHLEN; AUTY; EBERHARDT, 2018).

Há, ainda, discussões sobre qual a melhor nomenclatura para determinar essas zonas de crescimento da madeira. Alguns autores mencionam o lenho juvenil e lenho adulto como madeira interna (*corewood*) e madeira externa (*outerwood*). No entanto, Zobel e Sprague (1998), dizem que essa nomenclatura não é apropriada, porque se a árvore estudada tem pouca idade, por exemplo, 12 anos e a amostragem ocorrer em duas zonas, na parte interna (*corewood*) e na parte externa (*outerwood*), toda a madeira seria pertencente ao lenho juvenil, devido à baixa idade. Como resultado, esse estudo hipotético não estaria representando o lenho adulto, apenas trataria de madeira juvenil. Por isso, os autores afirmam que lenho/madeira juvenil e adulta são melhores para tratar sobre a porção de madeira formada nos primeiros anos e a porção formada já com a árvore adulta, respectivamente. Portanto, lenho juvenil e adulto será a nomenclatura utilizada neste estudo.

Outro ponto necessário para a compreensão do tema foi discutido por Zobel e Sprague (1998), Larson *et al.* (2001) e Burkhart e Tomé (2012), de que o lenho juvenil não se forma apenas quando a árvore é jovem. Ele é formado durante todo o período vegetativo da árvore, próximo à medula. Isso ocorre quando a árvore envelhece o suficiente para produzir lenho adulto, nesse estágio, ela continua formando os dois lenhos simultaneamente, dependendo da localização desse lenho no tronco da madeira (direção longitudinal) (LARSON *et al.*, 2001). O lenho juvenil é formado na copa (crescimento em altura), enquanto no tronco (na parte mais externa), é formado lenho adulto. Assim, tem-se uma forma geométrica próxima a de um cone, que está localizado ao redor da medula ao longo da altura da árvore. A Figura 1 foi baseada no estudo de Zobel e Sprague (1998) e ilustra o crescimento em altura e diâmetro de uma árvore com sua formação de lenhos juvenil e adulto.

Figura 1 – Crescimento em altura e diâmetro de uma árvore, com destaque para a formação de lenho juvenil.



Fonte: Adaptado de Zobel e Sprague (1998).

Pode-se observar pela Figura 1, que as toras de base (primeira e segunda tora) em árvores mais velhas, terão menor proporção de lenho juvenil quando comparado a toras do topo ou de árvores mais jovens. Essa proporção de lenho juvenil é definida pela razão entre o lenho juvenil e o lenho adulto. Ela diminui consideravelmente com o aumento da idade da árvore porque a quantidade relativa do lenho juvenil para o lenho adulto diminui (ZOBEL; SPRAGUE, 1998).

Embora haja dois lenhos distintos (juvenil e adulto) não se pode afirmar onde termina exatamente o lenho juvenil. Não existe, ainda, o conhecimento de um único ponto para a mudança entre os dois lenhos, já que a transição não é abrupta, mas gradual (BURKHART; TOMÉ, 2012). No entanto, há uma zona em que as características do lenho juvenil vão mudando de forma mais pronunciada, até se tornarem menos parecidas com as do lenho juvenil e mais com o lenho adulto. Essa zona de mudança é chamada de zona de transição e seu tamanho varia entre espécies (ZOBEL; SPRAGUE, 1998).

O local exato onde o lenho juvenil acaba é difícil de ser estabelecido, mas Zobel e Sprague (1998), comentaram que esse limite depende de qual propriedade da madeira é usado para defini-lo. Conforme a propriedade escolhida para a avaliação, o lenho juvenil pode compreender mais anéis de

crescimento ou menos. Contudo, os autores afirmam que normalmente esses limites estão entre um e dois anéis de crescimento para mais ou para menos. Larson *et al.* (2001) comentaram com base em outros estudos, que além da zona de lenho juvenil (primeiros 8 anéis de crescimento), mais dois a quatro anéis são adicionados por fazerem parte da zona de transição. Essa quantidade passou a ser aceita como parte da zona de lenho juvenil por investigadores do assunto.

Essa zona de lenho juvenil distingue-se muito do lenho adulto anatomicamente. Dentre as propriedades anatômicas, observa-se que o lenho juvenil apresenta traqueóides mais curtos, menor quantidade de lenho tardio, maiores ângulos da microfibrila (AMF) e ocasionalmente, quantidades desproporcionais de lenho de compressão, distorção dos padrões da grã e depósitos de resina (ZOBEL; SPRAGUE, 1998; LARSON *et al.*, 2001; BENDTSEN; SENFT, 1986; BALLARIN; PALMA, 2003; PALERMO *et al.*, 2013; TREVISAN *et al.*, 2014; POLLET *et al.*, 2017). Já o lenho adulto tem características de maiores comprimentos dos traqueóides, maior proporção de lenho tardio e menores larguras dos anéis de crescimento, maiores densidades e melhores propriedades mecânicas (MOORE *et al.*, 2012; ERASMUS *et al.*, 2018).

Com base no comprimento dos traqueóides, Bendtsen e Senft (1986) afirmaram haver um aumento do comprimento a partir do primeiro ano de crescimento e o lenho juvenil é formado até o 18.º ano para o *Pinus taeda* com 30 anos.

Ao estudar as diferenças entre lenhos juvenil e adulto de *Pinus taeda* com árvores de 37 anos, Ballarin e Palma (2003) constataram existir um aumento acentuado e linear (66,5%) do comprimento do traqueóide, então ocorre uma diminuição e por fim a estabilização. O comprimento médio dos traqueóides foi de 4,2 µm e de 5,32 µm para o lenho juvenil e adulto, respectivamente. Com base nesses resultados, os autores consideraram que o lenho juvenil é formado até o 14.º anel, entre o 14.º a 18.º lenho de transição e acima do 18.º anel se forma o lenho adulto.

Para o *Pinus elliottii* o lenho juvenil foi formado até o 7.º anel de crescimento e o lenho adulto passou a ser formado apenas após o 23.º anel de

crescimento. Sendo que os autores consideraram do 7.º ao 23.º anel como um lenho de transição (PALLERMO *et al.*, 2013).

Trevisan *et al.* (2014) também observaram que a característica anatômica de comprimento dos traqueóides aumenta com a idade para o *Pinus elliottii* com 30 anos. Com base na análise realizada, os autores chegaram a uma idade de transição de 10 anos para a espécie.

As diferenças anatômicas do lenho juvenil em comparação ao lenho adulto refletem nas propriedades físico-mecânicas. Dentre as propriedades físico-mecânicas do lenho juvenil há menor densidade, menor rigidez e resistência à flexão estática e compressão (BENDTSEN; SENFT, 1986; ZOBEL; SPRAGUE, 1998; BALLARIN; PALMA, 2003; PALERMO *et al.*, 2013; POLLET *et al.*, 2017). Por consequência, uma alta proporção de lenho juvenil na tora pode ser um fator crítico na qualidade dos produtos à base de madeira sólida (ZOBEL; SPRAGUE, 1998; MOORE *et al.*, 2012; WESSELS *et al.*, 2011; RAIS *et al.*, 2014) e leva a um efeito negativo na qualidade da madeira que é particularmente problemático para o uso de madeira estrutural (LASSERRE *et al.*, 2009). Dessa forma, há vários estudos buscando delimitar um ponto de mudança entre os lenhos juvenil e lenho adulto.

Ao estudar o ponto de demarcação entre o lenho juvenil e lenho adulto, além do comprimento dos traqueóides, Bendtsen e Senft (1986) avaliaram a densidade, MOE e MOR à flexão estática e a resistência a compressão paralela às fibras. Os autores concluíram que com base nessas propriedades físico-mecânicas o lenho juvenil é formado até o 12.º anel de crescimento para o *Pinus taeda* com 30 anos.

Em um estudo com a madeira de *Pinus taeda* de 37 anos, para avaliar as propriedades de rigidez e resistência, os autores observaram que o lenho juvenil foi 54% e 47% menor do que o adulto, respectivamente. Já a densidade a 12% de umidade foi 26% maior no lenho adulto (BALLARIN; PALMA, 2003). Resultados similares foram obtidos para a madeira de abeto de douglas (*Pseudotsuga menziesii*) com idade variando de 41 a 69 anos. Neste estudo, até o 15º ano de crescimento a madeira foi considerada juvenil e suas propriedades comparadas com as do lenho adulto foram de 11% menores para a densidade, 15% menor para a compressão axial, e 20% e 22% menor para a resistência e rigidez a flexão (POLLET *et al.*, 2017).

Palermo *et al.* (2013) estudaram as propriedades mecânicas do *Pinus elliottii*. Eles constataram que quando a densidade foi utilizada para demarcar o limite entre os lenhos, o lenho adulto era formado a partir do 17.º anel de crescimento e o lenho juvenil era formado até aproximadamente o 5.º anel.

De forma geral, as propriedades mecânicas avaliadas para o *Pinus taeda* tem uma tendência de aumento com a idade (BENDTSEN; SENFT, 1986). Assim, pode-se observar que o lenho juvenil e lenho adulto apresentam diferenças entre si e que estas podem ser influenciadas pelas características anatômicas. Estas características e propriedades, juntas, influenciam na qualidade da madeira.

2.4.4 Grã

A grã refere-se à orientação dos elementos verticais constituintes do lenho, em relação ao eixo longitudinal da árvore ou das peças de madeira. As variações ocorrentes na grã derivam de diferentes influências no processo de crescimento da árvore. Essa variação pode ocorrer ao redor dos nós, mas também devido a fatores genéticos e como resposta a forças externas. Os tipos de grãs mais comuns são grã direita, grãs irregulares: espiralada, entrecruzada, ondulada e inclinada. Os tipos de grãs seguem explicadas conforme Burger e Richter (1991).

Na grã direita, considerada normal, seus tecidos axiais são orientados paralelamente ao eixo principal da peça de madeira. Essa grã propicia elevada resistência a madeira, apresenta fácil processamento e não tem deformações indesejáveis devido à secagem da madeira.

Dentre as grãs irregulares, há a grã espiralada, cujos elementos axiais são orientados espiralmente ao longo do eixo da árvore. Em madeiras com grandes espirais a madeira pode apresentar limitações industriais, como a diminuição da resistência mecânica e deformações na secagem.

Na grã entrecruzada, a orientação dos tecidos axiais se apresenta em diversas direções ao longo do eixo. A resistência mecânica não é muito afetada, mas durante a secagem a madeira apresenta maior propensão a empenamentos. Na grã ondulada, seus elementos axiais alteram constantemente sua direção, aparecendo como uma linha sinuosa regular.

Na grã inclinada, há um desvio angular nos elementos axiais em relação ao eixo longitudinal da peça. É presente em árvores cujos troncos são excessivamente cônicos. Neste tipo de grã, quanto maior o desvio, menor é a resistência mecânica e mais acentuada é a ocorrência de deformações na secagem.

A irregularidade da grã pode afetar consideravelmente as deformações em madeiras submetidas à flexão. Essa irregularidade faz com que a madeira responda de forma instável e inesperada quando solicitada mecanicamente, podendo impactar em elementos fletidos (BURGER; RICHTER, 1991).

A inclinação da grã, representada pelo ângulo entre o sentido das fibras e o eixo central do tronco, quando acima de 6.°, pode impactar diretamente nas propriedades da madeira (ISO, 2018; ABNT, 1997), tais como cisalhamento, resistência e módulo de elasticidade a flexão e compressão (CARRASCO; MANTILLA, 2016; MANIA; SIUDA; ROSZYK, 2020).

Em um trabalho avaliando a influência da grã nas propriedades de resistência e módulo de elasticidade a flexão em madeiras tropicais (RAVENSHORST; GARD; KUILEN, 2020), foi concluído que o principal fator que influencia a resistência a flexão é o ângulo da grã. Os autores ressaltaram a dificuldade de mensurar a grã antes dos testes, e que a mensuração após o teste pode apresentar uma melhor indicação do real ângulo da grã.

Com um tomógrafo acústico, Carrasco *et al.* (2017), avaliaram o módulo de elasticidade em função da inclinação das fibras. Os resultados indicaram para todas as seis espécies avaliadas, uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da inclinação das fibras.

Carrasco e Mantilla (2016) estudaram diferentes inclinações dos anéis de crescimento no teste de cisalhamento em madeira de *Eucalyptus saligna*, obtiveram tensões ao cisalhamento médias decrescentes entre os ângulos de 0° a 90.°, variando em 15.°.

Em um estudo avaliando o MOR e o MOE à flexão em cinco espécies diferentes, os autores constataram uma redução de cerca de 60% da resistência com o aumento da inclinação do ângulo em 15° (MANIA; SIUDA; ROSZYK, 2020).

Esses diferentes estudos indicam que existe uma variação das propriedades mecânicas decorrente da inclinação da grã. Mesmo que a grã da

espécie seja considerada reta, pode haver diferenças do ângulo da grã dentro de uma mesma árvore, devido tipo de corte do desdobro. Já em corpos de prova livre de defeitos, a localização dos corpos de prova que são retirados das tábuas de madeira podem apresentar variações do MOR e MOE devido ao desvio da grã.

2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

As propriedades físicas da madeira são influenciadas por diversos fatores, como a constituição anatômica, idade da árvore, o ângulo da grã, o teor de umidade, a densidade, a duração da tensão e da deformação, as falhas na madeira e a presença de nós etc. (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975). O conhecimento da variabilidade interna das propriedades da madeira permite seu melhor uso tecnológico (EVANGELISTA *et al.*, 2010).

Quando se usa a densidade (ρ) para avaliar a qualidade da madeira, passa-se a avaliar a madeira como um material micro estruturado e não apenas com características isoladas, tais como comprimento do traqueóide e espessura da parede (LOURENÇON *et al.*, 2014). Isso ocorre porque as propriedades físicas são um reflexo e resultado das características das propriedades anatômicas e condições de crescimento.

2.5.1 Teor de umidade

Como a madeira é proveniente de um organismo vivo, ela contém água em sua estrutura. O peso dessa água na madeira é chamado de teor de umidade (tu). Em determinada faixa, a umidade influencia na resistência da madeira à decomposição, resistência mecânica, rigidez, usinabilidade, impregnação, acabamento, dentre outros (KOLLMAN; KUENZI; STAMM, 1975). O conhecimento das relações madeira-água é de extrema importância, pois podem explicar possíveis comportamentos da madeira antes, durante e após a fabricação de produtos à base de madeira sólida.

A influência da umidade relativa e da temperatura nas propriedades da madeira não é um conceito novo (KOLLMAN; KUENZI; STAMM, 1975; FPL, 2010). As propriedades de flexão da madeira são influenciadas pelo teor de

umidade. De forma geral, há um aumento das propriedades de resistência e rigidez à flexão com a diminuição da umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (SKAAR, 1972). Contudo, o módulo de elasticidade é menos sensível às mudanças da temperatura quando o teor de umidade de equilíbrio é menor (GREEN; EVANS, 2008).

Desta forma, vários modelos foram criados para determinar as variações e influências do teor de umidade na resistência e o módulo de elasticidade. A estimativa mais aceita e usada para descrever a relação entre os módulos de elasticidade e o teor de umidade foi baseada em um modelo proposto por Green *et al.* (1986) sendo utilizado atualmente na norma americana D1990 e na europeia EN 384 (NOCETTI *et al.*, 2015).

Adicionalmente a esses efeitos, há uma dependência entre o teor de umidade e a madeira com e sem defeitos. Além das diferenças que ocorrem com madeiras de melhor qualidade e com diferentes tamanhos, como corpos de prova e tábuas serradas. Isto foi observado no estudo conduzido por Ido *et al.* (2013), que compararam diferentes tamanhos de madeira: corpos de prova e toras. Os autores concluíram que a resposta às mudanças do teor de umidade foi maior para pequenos corpos de prova e com maior qualidade da madeira.

Contudo, grande parte desses estudos experimentais e numéricos foram realizados com a madeira serrada e muitas vezes não foi considerada a direção longitudinal. Além de que grande parte desses estudos não considerou o efeito potencial das linhas de cola, como acontece em produtos engenheirados, como exemplos, o *Laminated Veneer Lumber* (LVL), a Madeira Lamelada Colada (MLC) e a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC). Pensando nisso, Chiniforush, Valipour e Akbarnezhad (2019) conduziram um estudo avaliando esses efeitos em alguns produtos engenheirados. Os autores concluíram que para o MLCC e o LVL, houve um grande aumento do coeficiente de difusão com respeito à temperatura. Esse aumento foi maior na direção longitudinal do painel e menor na direção transversal.

Considerando os estudos sobre os impactos do teor de umidade na madeira, as normas e empresas adotaram um padrão para a fabricação de elementos colados, com uma faixa de 10 a 14% do teor de umidade. Essa faixa é considerada a melhor para se obter as melhores propriedades da interação madeira-adesivo. Já que o teor de umidade da madeira, combinado à água

presente nos adesivos, pode influenciar significativamente no umedecimento, fluxo e penetração do adesivo na madeira, e consequentemente, impactar a cura (FRIHART; HUNT, 2010).

2.5.2 Densidade

A densidade básica da madeira é definida pela razão da massa seca pelo volume verde. A porosidade da madeira, isto é, a razão do material da parede celular pelo lúmen, é o fator de principal contribuição na densidade básica. Já a densidade aparente é a razão da massa pelo volume da madeira em uma determinada condição de umidade, e esta, pode ser variável conforme o teor de umidade da madeira.

De acordo com Larson *et al.* (2001), pesquisadores buscaram uma relação palpável para definir a correlação entre a densidade e as condições de crescimento das árvores. No início, acreditava-se que o baixo crescimento e consequentemente anéis de crescimento estreitos (zona sem lenho juvenil), teriam madeiras com melhores propriedades. Mas os pesquisadores descobriram que apenas os anéis de crescimento não eram suficientes para avaliar a qualidade dessa madeira. Já que estudos, com o *Pinus taeda* concluíram que anéis largos não apresentavam, necessariamente, baixa densidade. Segundo o autor, o que ocorre de fato é que a propriedade está altamente correlacionada à quantidade de lenho tardio e aumenta no sentido medula-casca. Isto é observado tanto em árvores com crescimento rápido quanto lento. Em função disso, a densidade pode ser modificada por condições silviculturais e ambientais, que podem afetar o desenvolvimento da copa e do crescimento da árvore, podendo ter como resultado uma variação da densidade.

A densidade varia entre espécies, na espécie e no indivíduo, tanto no sentido radial quanto no longitudinal. Além do tipo de sítio de crescimento das árvores, seja solo e/ou clima, essa variação ocorre devido às árvores apresentarem estruturas de crescimento distintas, diferentes elementos anatômicos e diferentes quantidades de constituintes químicos (BURGER; RICHTER, 1991; TRIANOSKI *et al.*, 2013; MACHADO *et al.*, 2014; MELO, 2015; ACQUAH *et al.*, 2018).

A densidade é considerada uma das propriedades mais importantes, devido ao seu efeito em outros atributos da madeira. Esta propriedade comumente utilizada em pesquisas pode explicar ou estar relacionada com características como a resistência e rigidez à flexão, compressão, cisalhamento, lenhos tardio e inicial, lenhos juvenil e adulto (TROVATI; FERRAZ, 1984; TRIANOSKI *et al.*, 2013; HEIN *et al.*, 2013; PALERMO *et al.*, 2013; WESSELS *et al.*, 2015; ACQUAH *et al.*, 2018).

Avaliando a densidade básica e as propriedades mecânicas de uma população de *Pinus taeda* pelo método NIR (espectroscopia no infravermelho próximo), Acquah *et al.* (2018), relataram que o fator determinante para as diferenças da densidade é a espessura da parede celular. Devido a essas diferenças de crescimento em função do ambiente, isso pode afetar o MOE e o MOR, sendo que a densidade pode explicar 20% do MOE e 40% do MOR. Resultados similares foram obtidos por Hein *et al.* (2013) que ao avaliar madeiras de eucalipto de seis anos, constataram que a densidade pode explicar 68% do MOR e 82% do MOE, no entanto, as diferenças entre espécies podem ser devido a inúmeros fatores, como a constituição anatômica.

Melo (2015) avaliou a madeira de *Pinus taeda* com idades de oito, 14, 18 e 26 anos quanto a densidade básica e sua variação no sentido radial e longitudinal. O autor constatou que a densidade diminui com a altura e aumenta com a idade e sentido radial. As densidades para as idades de oito, 14, 18 e 26 anos foram de 0,332, 0,393, 0,397, 0,447 g.cm⁻³, respectivamente.

Ao estudar a variação longitudinal da densidade básica em espécies de *Pinus* tropicais com 17 e 18 anos, Trianoski *et al.* (2013) constataram uma correlação do percentual de lenho tardio com a densidade, indicando que o aumento do lenho tardio implica em um aumento da densidade. Já que as paredes celulares do lenho tardio são mais espessas que as do lenho inicial. Os autores ainda concluíram que existe uma variabilidade da densidade ao longo do fuste da árvore e que esta decresce na direção base-topo. Sendo que, por este motivo, as toras mais próximas à base apresentam melhor qualidade para uso estrutural, como maior resistência mecânica.

Nota-se que a densidade é uma propriedade de grande importância e que apresenta diferentes interações com outras propriedades. Mas, devido à

alta variabilidade da densidade, as normas preconizam que esta propriedade seja estimada para cada lote de madeira.

A norma brasileira NBR 7190-2 (ABNT, 2022b) prevê que a densidade aparente seja realizada no teor de umidade de 12%, a fim de padronizar os resultados e comparações de outros estudos. Para determinar a densidade de madeira estrutural, a EN 384 (EN, 2004) indica que os procedimentos para determinação da densidade sejam realizados conforme a normativa ISO 13061-2 (ISO, 2014).

2.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

As propriedades mecânicas são uns dos parâmetros mais importantes para avaliar a qualidade da madeira. A rigidez e resistência da madeira juntas dão informações sobre o potencial de uma madeira ser utilizada para determinado fim. A rigidez é determinada pelo módulo de elasticidade e a resistência pelo módulo de ruptura.

O módulo de elasticidade (MOE) é a razão entre a tensão e a deformação na direção da carga (força) aplicada, ou seja, é a capacidade da madeira de sustentar uma certa força sem que ocorra uma deformação plástica permanente. O teste consiste basicamente na medição da deformação ocasionada ao aplicar uma carga no meio do vão, cujas distâncias mínimas são normalmente definidas por normas e podem variar de 19 a 21 vezes a espessura da peça de madeira a ser avaliada (ABNT, 2022b; ASTM, 2018; EN, 2012).

O módulo de ruptura (MOR) é a força máxima que uma peça de madeira suporta, seja à flexão ou em outro teste de resistência, antes que ocorra a ruptura. A propriedade só pode ser obtida destrutivamente, ou seja, não é possível utilizar o material testado após ser avaliado, como no MOE.

As propriedades mecânicas podem ser explicadas em maior ou menor grau por características da madeira como o comprimento dos traqueóides, a largura dos anéis de crescimento, a quantidade de lenho tardio, a densidade, a grã e a presença e tamanho de nós (LARSON *et al.*, 2001; BURKHART; TOMÉ, 2012). Além de muitas vezes, estarem correlacionadas entre si, *e.g.*, o módulo

de elasticidade explica o módulo de ruptura em maior ou menor grau, conforme a espécie avaliada (BUTLER *et al.*, 2016).

Devido às propriedades mecânicas estarem atreladas com outras propriedades e características de crescimento da madeira, juntas elas fornecem um intricado de informações para melhor compreender o potencial da madeira.

A rigidez e a resistência são as propriedades mais frequentemente utilizadas nos estudos ao redor do mundo e consideradas de medida comum (POWER *et al.*, 2016). Além disso, elas são atreladas à testes de flexão estática destrutivo e/ou não destrutivo, compressão, tração e cisalhamento.

2.6.1 Módulo de elasticidade

O MOE é uma importante propriedade mecânica e o maior determinante do potencial da madeira para um determinado produto (JOZCA; MIDDLETON, 1994). Quanto maior o MOE, maior é a gama de produtos para qual a madeira avaliada pode ser usada, como por exemplo, em produtos estruturais (VAUGHAN *et al.*, 2020).

Ela é uma propriedade que pode ser testada destrutivamente ou não, e por esta razão, é uma das propriedades mais usadas em estudos de avaliação da madeira (SANTINI; HASELEIN; GATTO, 2000; DOWNES *et al.*, 2002; BALLARIN; PALMA, 2003; GONÇALEZ *et al.*, 2018; MUSTEFAGA *et al.*, 2019; VAUGHAN *et al.*, 2020; MARINI *et al.*, 2021). Além disso, o MOE é positivamente correlacionado com a densidade, idade cambial, menor largura dos anéis de crescimento, com o comprimento dos traqueóides e o menor ângulo da microfibrila, pois a fibra é considerada a fonte de elasticidade e resistência da madeira (LARSON *et al.*, 2001; BURKHART; TOMÉ, 2012; POLLET *et al.*, 2017). O MOE ainda pode apresentar diferenças devido a fatores como a densidade e localização geográfica do povoamento, sítio de crescimento, a esbeltez do tronco e pela fertilização do solo (DOWNES *et al.*, 2002; BUTLER *et al.*, 2016; POLLET *et al.*, 2017; ROTH *et al.*, 2007; CLARK; BORDERS; DANIELS, 2004).

Ao averiguar a influência da densidade no MOE, Ballarin e Palma (2003) obtiveram correlações fracas, porém positivas, entre as duas

propriedades, em ambos os lenhos juvenil e adulto da madeira de *Pinus taeda* com 37 anos. Em um estudo avaliando as correlações entre diferentes propriedades, Mustefaga *et al.* (2019), apresentaram altas correlações entre a densidade e o MOE para a madeira de *Pinus taeda* com 12 anos. A ocorrência de variações das correlações entre a densidade e o MOE são comuns entre estudos, mas de forma geral, sempre há um aumento da rigidez com a maior densidade da madeira.

Para muitas espécies, incluindo o *Pinus taeda*, o MOE aumenta com a idade cambial (VAUGHAN *et al.*, 2020). Para os *Pinus*, normalmente essa variação radial é muito pronunciada e pode ocasionar valores de MOE com grandes variações (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; BURKHART; TOMÈ, 2012). Em um estudo com madeira serrada de *Pinus taeda* de talhões de manejo intensivo, Butler *et al.* (2016) obtiveram que quanto maior for a dimensão das tábuas maior será o MOE. Contudo, a variação das propriedades mecânicas em peças de grandes dimensões não é descartada por Vaughan *et al.* (2020) e os autores afirmam que isso pode ser um desafio para o uso da madeira destinada para fins estruturais.

A menor largura dos anéis pode apresentar correlação positiva com o MOE, já que está atrelado a densidade da madeira. No entanto, tem-se conhecimento de poucos estudos que analisaram a influência dos anéis de crescimento no MOE, visto que maioria utiliza a densidade como propriedade base para a pesquisa. Com os estudos atualmente disponíveis pode-se conceitualizar que quanto maior for o número de anéis presentes na madeira e a proporção de lenho tardio no anel de crescimento, maior será o MOE (SANTINI; HASELEIN; GATTO, 2000; DELUCIS *et al.*, 2013; WESSELS *et al.*, 2015; GONÇALEZ *et al.*, 2018). Donnelly, Lundquist e O'Reilly (2017) afirmam, com base em outros estudos, que há evidências de que madeiras com altas proporções de lenhos iniciais apresentam menores propriedades mecânicas, resultando em menor qualidade e consequentemente menor valor de mercado.

Em um estudo com a madeira de *Pseudotsuga menziesii*, Pollet *et al.* (2017) constataram que o efeito da largura dos anéis de crescimento nas propriedades mecânicas é maior no lenho adulto do que no lenho juvenil. Sendo que quanto maior a largura dos anéis de crescimento no lenho adulto, menor serão as propriedades mecânicas.

Alguns estudos com os traqueóides são focados no ângulo da microfibrila, sendo que esta característica pode explicar boa parte do módulo de elasticidade (DONNELLY; LUNDQUIST; O'REILLY, 2017). Em suma, os resultados indicam que em madeiras juvenis, o ângulo da microfibrila é maior, e consequentemente, a madeira apresenta menor MOE. Com o aumento da idade cambial a árvore forma madeira adulta e o ângulo da microfibrila tende a diminuir, criando madeira com maior rigidez (LARSON *et al.*, 2001; CLARK; BORDERS; DANIELS, 2004; VAUGHAN *et al.*, 2020).

Adicionalmente, observa-se a ocorrência de correlação entre teor de umidade e o MOE, sendo que quanto maior o teor de umidade menor tende a ser o MOE. Isto é uma informação muito importante ao se classificar a madeira serrada de forma não destrutiva, já que os testes podem ser realizados em condições de campo, ou após a secagem para predizer a qualidade do material e sua classe de resistência (LLANA; IÑIGUES-GONZALES; ARRIAGA, 2014; NOCETTI *et al.*, 2015).

O MOE é positivamente correlacionado com o MOR na flexão (BUTLER *et al.*, 2016; GONÇALEZ *et al.*, 2018) e embora em algumas espécies sua influência seja considerada moderada, ele é utilizado como preditor da resistência para a classificação da resistência da madeira.

O MOE ainda sofre influência da quantidade de lenho juvenil presente na madeira. Aquah *et al.* (2018) concluíram que o MOE aumenta quando a proporção de lenho juvenil diminui. Visto que no lenho juvenil, as paredes das células são mais finas e com maior lúmen, caracterizando uma área da madeira com menor densidade.

Tendo em vista que com o aumento da idade cambial a proporção de lenho juvenil no tronco diminui, a densidade e o comprimento dos traqueóides aumentam, o MOE tende a ser maior no sentido radial, principalmente em madeiras de árvores maduras. Isto foi evidenciado em pesquisas de Ledford *et al.* (2015) que avaliaram madeira serrada de *Pinus taeda* e concluíram que a partir de 26 anos as árvores apresentariam os valores mínimos de MOE para o uso em produtos estruturais.

Ao avaliar a influência do desbaste no MOE, Biblis e Carino (1997) constataram diferença entre talhões de rápido crescimento de *Pinus taeda*, sem e com desbaste aos 25 anos. As tábuas de 3,8 cm x 14 cm (espessura x

largura) provenientes das áreas com desbaste, apresentaram cerca de 52% das tábuas atendendo os valores mínimos solicitados pelas normas. Em contrapartida, os talhões não desbastados apresentaram apenas 39% das tábuas atendendo os valores mínimos de rigidez.

2.6.2 Módulo de ruptura

O MOR é uma importante propriedade da madeira que permite aos engenheiros e outros projetistas calcular e criar projetos de estruturas em madeira (WESSELS *et al.*, 2015). É uma das propriedades mais importantes e usada tanto para o cálculo dos projetos em madeira (ABNT, 2022a), quanto em diversos estudos para avaliar o potencial da madeira, como os exemplos de Butler *et al.* (2016), Moya *et al.* (2013), Trianoski *et al.* (2014), Mustefaga *et al.* (2019).

Para a maioria das espécies, o MOR é positivamente correlacionado com a densidade e o comprimento dos traqueóides (LARSON *et al.*, 2001; BURKHART; TOMÉ, 2012). Como a propriedade é altamente correlacionada com a densidade, está sujeita às variações radiais que a densidade apresenta, principalmente devido às diferenças de idade (LARSON *et al.*, 2001). Usualmente, a densidade aumenta ao se afastar da medula e como mais tensão é requerida para causar a ruptura do material, consequentemente o MOR da madeira se torna maior (ACQUAH *et al.*, 2018).

Um estudo da relação da densidade com o MOR, comparando sua influência entre a madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* foi executado por Ballarin e Palma (2003). Eles concluíram que a influência da densidade é mais forte no lenho adulto do que no lenho juvenil, ou seja, quanto maior a densidade do lenho adulto, maior o módulo de ruptura. Para o lenho juvenil, a maior densidade da madeira não aumenta o MOR na mesma proporção. No estudo, o MOR médio no lenho adulto e juvenil foram de aproximadamente 127 MPa e 87 MPa, respectivamente. Os autores também observaram uma maior variação dos dados no lenho juvenil do que no lenho adulto.

Trianoski *et al.* (2014) ao avaliar a madeira de diversas espécies de coníferas pelas propriedades mecânicas e suas correlações com a densidade,

constataram para o *Pinus taeda* de 17 e 18 anos, um MOR médio de 64 MPa. Os autores obtiveram fortes correlações de 89% entre a densidade e o MOR.

Mustefaga *et al.* (2019) caracterizou a madeira de *Pinus taeda* com 12 anos proveniente do sul do Brasil. As tendências de aumento do MOR com a densidade foram observadas no estudo, sendo que o MOR médio foi de 56,3 MPa e a densidade de 0,41 g·cm⁻³ com uma correlação entre as duas propriedades de 77%.

Ao examinar madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* de duas regiões distintas no Uruguai, cujas idades das árvores eram de 15 e 25 anos, Moya *et al.* (2013) constataram que o MOR tende a aumentar no sentido radial, acompanhando o aumento da densidade no mesmo sentido. Os autores obtiveram médias de 65,6 MPa para a propriedade, nas duas espécies. Também foi constatado que entre os corpos de prova da primeira posição avaliada (próxima à medula) e da última (próximo a casca) houve um aumento de 19% e 23% no MOR à flexão para a madeira com 25 e 15 anos, respectivamente. Enquanto a densidade apresentou aumentos de 11,4% e 12,5% para 25 e 15 anos, respectivamente. No entanto, neste estudo, os autores não avaliaram as características dos anéis de crescimento.

Larson *et al.* (2001) afirmaram que o MOR sofre influências devido às variações da densidade nos diferentes anéis de crescimento. Assim, em tábuas cortadas radialmente, que compreendem, por exemplo, 18 anéis de crescimento (tábuas com 15 cm de largura e uma taxa de crescimento de 3 anéis por polegada) a variação na tábua seria, segundo os autores, uma importante fonte de variação da propriedade.

Ao estudar a influência da copa nos modelos para prever as propriedades mecânicas da madeira de *Picea mariana* (black spruce), com árvores entre 45 e 119 anos, Power *et al.* (2016) obtiveram os valores médios do MOR variando de 19,04 a 89,57 MPa, com média de 61,93 MPa. Em outra parte dos resultados, os autores constataram que a variação do MOR médio no sentido longitudinal das árvores foi de 5,21 MPa maior para as toras basais. Essa diferença foi atribuída ao fato de que nas toras mais altas da árvore houve uma maior proporção de lenho juvenil, já que a propriedade foi formada nos primeiros anos de crescimento e estava sob a influência da copa e da idade cambial. Os autores citaram que a presença de nós pode afetar o MOR,

contudo é um fator que pode ser controlado até um certo nível por práticas silviculturais.

Assim, o MOR pode ser afetado por práticas silviculturais, como as práticas que favorecem as altas taxas de crescimento da madeira em talhões com rotações curtas. As maiores taxas de crescimento aumentam as proporções de lenho juvenil no tronco e conseqüentemente diminui a quantidade de madeira com alta resistência (DOWNES *et al.*, 2002).

Biblis e Carino (1997) constataram que em povoamentos de rápido crescimento de *Pinus taeda*, as tábuas provenientes dos talhões que tiveram a prática do desbaste realizada aos 25 anos, apresentaram cerca de 95% das tábuas de 3,8 cm x 14 cm atendendo os valores mínimos solicitados pelas normas. Já os talhões não desbastados apresentaram 92% das tábuas atendendo os valores mínimos de resistência.

Biblis e Carino (1997; 1999) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas do *Pinus taeda* provenientes de plantações de rápido crescimento no sul dos EUA. No primeiro estudo, a madeira avaliada tinha 40 anos e no segundo 50 anos. Os autores concluíram que 95% das tábuas com dimensões de 3,8 cm x 14 cm provenientes de toras de 40 anos apresentavam os valores mínimos de resistência requeridos pelas normas utilizadas. Já para as tábuas com 50 anos a porcentagem foi de 99%. Com as outras propriedades avaliadas, como o módulo de elasticidade, os autores concluíram que a rotação de 50 anos seria a mais indicada para a espécie por apresentar maior número de tábuas com as propriedades mecânicas mínimas requeridas pelas normas de classificação da madeira.

2.7 CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

A classificação da madeira permite à cadeia de produção de multiprodutos de madeira um maior aproveitamento da tora. Visto a grande variabilidade dentro e entre árvores da mesma espécie, a classificação do material auxilia nas tomadas de decisões sobre quais partes da tora/árvore podem ser destinadas à fabricação dos produtos à base de madeira, de modo que ocorra o maior aproveitamento com a maior qualidade.

Atualmente, a madeira serrada pode ser classificada de duas formas: a classificação visual, que consiste em avaliar visualmente as superfícies da madeira e separá-las pela quantidade de defeitos aparentemente presentes; e a classificação mecânica, que avalia a propriedade de rigidez (MOE) das madeiras de forma não destrutiva, e esta avaliação pode ser realizada por máquinas ou por operários em testes de campo.

2.7.1 Classificação visual dos nós

Como a madeira é um material natural e heterogêneo, pode conter imperfeições devido ao crescimento, como os nós. A presença desses defeitos pode diminuir o desempenho da resistência e a rigidez da peça de madeira. Portanto, segundo a EN 14081-1 (EN, 2016b), a inspeção visual do material é uma inspeção para avaliar características que por algum motivo não são detectados pelas máquinas de classificação mecânica.

A norma europeia que rege a classificação visual da madeira para uso estrutural é a EN 14081-1 *Timber structures. Strength grades structural timber with rectangular cross section. Part 1 – General requirements*. Na norma verifica-se que devido à diversidade de padrões de classificação visual existentes em uso em diferentes países, atualmente é impossível estabelecer uma norma única para todos os estados-membros. Por isso, na norma os requisitos são princípios básicos para algumas características avaliadas.

Os requisitos para a inspeção visual das peças de madeira classificadas na norma EN 338 (EN, 2016a) estão apresentados na Tabela 1.

Assim, recorre-se ao Anexo A da norma europeia, que especifica a mensuração dos nós, desvio de grã e outros defeitos. No Anexo A observa-se que os métodos de classificação visual podem ser determinados por qualquer norma de classificação que atenda aos requisitos da EN 14081-1 e que esteja publicamente disponível. Na EN 14081-1 observa-se o possível uso do método descrito na EN 1310 (EN, 1997) para madeira serrada.

Tabela 1 – Características para a classificação visual com base na norma EN 14081-1 (EN, 2016b) para enquadramento nas classes da EN 338 (EN, 2016a).

Classe EN 338	Requisitos mínimos	
	≤ C18	> C18
Defeito		
Fissuras não passantes na espessura	≤ 1,5 m ou ½ do comprimento da peça ¹	≤ 1,0 m ou ¼ do comprimento da peça ¹
Fissuras passantes na espessura	≤ 1,0 m ou ¼ do comprimento da peça. Se localizado nas extremidades o comprimento não deve ser maior que 2 x a largura	Permitido apenas nas extremidades com um comprimento que não ultrapasse a largura
Inclinação das fibras	≤ 1:6	≤ 1:10
Diâmetro do nó de face	Até ½ da largura	Até ¼ da largura
Diâmetro do nó de borda	Até ¾ da espessura	Até ½ da espessura

¹ o que for mais restritivo.

FONTE: A autora (2023).

A norma EN 14081-1 prevê três possibilidades de especificação dos valores, sendo que entre estes, está a possibilidade de mensurar os defeitos em relação à área da seção transversal da madeira, utilizando como base os valores lineares medidos pela norma EN 1310 (EN, 1997).

Na norma EN 1310 (1997) observa-se todos os métodos para medidas de nós, desvio de grã, quantidade de anéis por polegada e outros defeitos da madeira. Embora as informações de mensuração dos nós estejam especificados na EN 1310, esta indica outras normas para atribuir as classes de classificação. Como, por exemplo, a NP 4305 (NP, 1995) que atribui as classes de resistência baseadas na classificação visual do Pinho Bravo (*Pinus pinaster*) proveniente de Portugal.

Desta forma, há várias normas específicas para cada região, país e espécie, que estão incluídas na listagem da NP EN 1912 (NP, 2013). Para espécies não incluídas na lista, como o *Pinus taeda* proveniente do Brasil, a norma afirma que a classe de qualidade pode ser atribuída desde que exista uma larga experiência ou resultados de uso e/ou resultados de ensaios. As classes de resistência podem ser atribuídas com base nos ensaios mecânicos descritos na EN 384 (EN, 2004). Contudo, como o Brasil ainda não possuía

uma norma de classificação visual ativa para madeiras destinadas ao uso estrutural antes do início da execução deste estudo, recorreu-se a métodos de classificação já estudados.

Como exemplos estão o estudo realizado por Rosa *et al.* (2020), que utilizaram a norma americana ASTM D245 (ASTM, 2019) para avaliação dos nós em madeira de coníferas de *Cryptomeria japonica* proveniente do sul do Brasil. A mesma norma fundamentou o trabalho de Carreira e Dias (2005), que avaliou a possibilidade de implementação de um método para avaliar as espécies brasileiras.

As classes de densidade designadas às tábuas conforme o tipo, quantidade e tamanho dos nós são apresentadas na Tabela 2. Esses limites estão baseados no estudo de Carreira e Dias (2005). Contudo, os mesmos limites podem ser obtidos por interpolação dos valores presentes nas tabelas da norma americana ASTM D245 (ASTM, 2019). Os valores (percentuais) representam a área máxima do diâmetro dos nós admitida em relação à área transversal da tábua, para mínima perda de resistência à flexão em uma determinada classe estrutural.

Tabela 2 – Valores máximos da área ocupada pelo nó na seção transversal conforme a ASTM D245 (ASTM, 2019).

Posição dos nós	SE	S1	S2	S3
Face e canto do lado	20%	25%	33%	50%
Centro da face	35%	45%	50%	75%

SE – classe especial; S1 – primeira classe; S2 – segunda classe; S3 – terceira classe.

FONTE: A autora (2023).

Tomando como exemplo uma tábua com largura de 150 mm e 25 mm de espessura, na qual a classe estrutural deverá ser SE, um nó presente no centro da face não poderá ser maior que 58 mm de diâmetro e um nó presente na lateral não poderá ser maior que 8,9 mm.

A Norma Europeia EN 14081-1 (EN, 2016) afirma que as fissuras podem ser ignoradas, exceto se tenham efeito significativo na resistência ao cisalhamento em vigas. Isso é observado na norma americana ASTM D245

(ASTM, 2019), em que diz que as fissuras e rachaduras apresentam pouca ou nenhuma influência nas propriedades mecânicas e por esta razão não apresentam restrições de classes estruturais. Em casos em que a rachadura ou fissuras estão próximas da área crítica de carregamento, e se, ultrapassam a dimensão da espessura, é aconselhável não utilizar a tábuas em elementos que serão fletidos (ASTM, 2019), contudo, ainda vale a experiência do operador na classificação.

2.7.2 Classificação visual dos anéis de crescimento

Na inspeção visual, há a avaliação dos anéis de crescimento. O estudo dos limites dos anéis de crescimento permite ao pesquisador obter informações sobre o crescimento da árvore ao longo dos anos passados, como na dendrocronologia. Bem como, informações para projetar o crescimento futuro baseado nos anéis de crescimento (NUTTO *et al.*, 2012; MACHADO *et al.*, 2013).

A metodologia consiste na medição dos raios dos anéis de crescimento com uma régua métrica, normalmente transparente e com o auxílio de uma lupa. Essa metodologia pode ser usada em espécies cujos anéis são visíveis a olho nu. Portanto, nas coníferas há uma maior facilidade para demarcação dos anéis de crescimento.

A madeira ainda pode ser classificada quanto a densidade, relacionada a quantidade de anéis de crescimento presentes em 1 pol. (25 mm). Esta classificação está inserida na Norma ASTM D 245 (ASTM, 2019).

De acordo com a Norma Americana ASTM D245 (ASTM, 2019), para a madeira ser classificada como densa, deve apresentar em média em uma das duas extremidades da peça, não menos que seis anéis anuais por polegada (25 mm) e um terço ou mais de lenho tardio, medido em uma linha radial representativa (Tabela 3). Nas tábuas que a média for inferior a quatro anéis anuais por polegada (25 mm), podem ser aceitas como densas se tiverem em média mais da metade de lenho de tardio. Esse procedimento foi realizado por Carreira e Dias (2005) confirmando a adequação para uso na avaliação da madeira de *Pinus taeda* brasileira.

Tabela 3 – Densidade da madeira pelo número de anéis de crescimento e a proporção do lenho tardio.

Classe	Número de anéis por polegada (25mm)	Proporção de lenho tardio no anel de crescimento
	≥ 6	33%
Densa	≥ 4	50%
Não-Densa	≥ 4	16%

FONTE: A autora (2023).

2.8 CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DE TÁBUAS

A manufatura de produtos estruturais a base de madeira requer, algumas vezes, tábuas com maiores larguras e espessuras. Consequentemente, pela existência de variação presente na árvore, essas tábuas normalmente apresentam diferentes propriedades mecânicas. Desse modo, a classificação da madeira permite a melhor utilização do material com a maior segurança para os cálculos de projeto.

A classificação pode ser realizada destrutivamente utilizando com base as propriedades de resistência a flexão, resistência a compressão, tração e cisalhamento em corpos de prova retirados de um lote de madeira (NASCIMENTO; OLIVEIRA; DELLA LUCIA, 2001). Contudo, para tábuas de madeira destinadas ao uso estrutural, tem-se a necessidade de uma classificação não destrutiva, para permitir o seu uso posterior. Com o avanço das pesquisas, notou-se a existência de correlações entre o MOE e o MOR nas peças de madeira (BUTLER *et al.*, 2016; GONÇALEZ *et al.*, 2018). Esse avanço facilitou os testes não destrutivos para obtenção do MOE, permitindo estimar o MOR. Por isso, a classificação mecânica tem grande aceitação comercial, por ser um método simples e eficiente.

A classificação não destrutiva pode ser realizada por máquinas automáticas ou por testes de flexão. A norma europeia que determina as condições para a classificação mecânica da madeira para uso estrutural é EN 14081- *Timber structures. Strength grades structural timber with rectangular cross section* (EN, 2016).

A avaliação da madeira com máquinas baseia-se no uso de sensores que avaliam determinadas características da madeira, como o MOE. Como as máquinas atribuem automaticamente uma classe de resistência, retira-se a importância da classificação visual (ARAUJO, 2015). No entanto, em casos em que não há ou que a classificação por máquinas é incompleta, utiliza-se, conjuntamente, a classificação visual, como já mencionado anteriormente.

A classificação das tábuas de madeira pode ser realizada por testes de flexão. O teste consiste na aplicação de uma carga/força conhecida no meio do vão de cada peça bi-apoiada e o deslocamento é medido no ponto do máximo de momento fletor com auxílio de um transdutor de deslocamento. Normalmente, utiliza-se a área de menor inércia da peça de madeira para a realização dos testes. Em tábuas de madeira destinadas para o uso estrutural para compor MLC ou MLCC, usualmente a carga é aplicada no sentido de menor inércia (*flatwise*), como observado em diversos estudos (KRAMER; BARBOSA; SINHA, 2014; HINDMAN; BOUDIN, 2015; ROSA *et al.*, 2020; VILELA; MASCIA, 2021; BAÑO *et al.*, 2018; PEREIRA; CALIL JUNIOR, 2019).

Com posse dos resultados dos ensaios destrutivos e não destrutivos, se obtém os valores de resistência e rigidez usados para classificar as tábuas. Segundo a norma brasileira NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) e a norma europeia EN 384 (EN, 2004), a classificação da classe de qualidade pela resistência ocorre em função do valor característico. Para a rigidez, o valor médio é considerado o valor característico.

O valor característico corresponde a uma fração da distribuição estatística de uma propriedade da madeira, normalmente o 5-percentil. O valor 5-percentil, também chamado de valor característico inferior (menor que o valor médio), é o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido em um dado lote de material. Para tal, admite-se que as resistências das madeiras tenham distribuições normais de probabilidades.

2.9 CLASSES DE RESISTÊNCIA DA NORMA EUROPEIA

A Norma Europeia que determina as classes de qualidade para as peças de madeira destinadas ao uso estrutural é a EN 338 (EN, 2016). Ela apresenta dados para espécies de folhosas e coníferas, determinados pelos

testes de flexão estática ou tração. A norma também provê os possíveis valores de densidade para cada uma das classes de resistência. As tabelas apresentam os valores característicos de resistência para diversas propriedades mecânicas e de módulo de elasticidade na flexão e no cisalhamento, bem como a densidade. Ao todo, os grupos de resistência da madeira são compostas por oito classes, descritas resumidamente na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores mínimos de resistência e rigidez à flexão e densidade para a classificação estrutural da madeira de coníferas pela norma europeia EN 338 (EN, 2016a).

Propriedade	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
$f_{m,k}$ (MPa)	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
MOE (kPa·mm ²)	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
ρ (kg·m ⁻³)	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430

$f_{m,k}$ - Resistência à flexão estática; MOE - Módulo de elasticidade à flexão; ρ - Densidade média.

2.10 CLASSES DE RESISTÊNCIA PELA NORMA BRASILEIRA

Atualmente, a Norma Brasileira que rege as classes de resistência para uso estrutural no Brasil é a ABNT NBR 7190-2 (ABNT, 2022b) e estipula os valores médios e característicos para as propriedades de resistência e o valor médio do módulo de elasticidade estimado pelo teste de flexão não destrutivo. Ela compreende três classes de qualidade para espécies de *Pinus*. Na Tabela 5 podem ser observados os valores mínimos requeridos pela norma.

Tabela 5 - Valores mínimos de densidade, resistência e rigidez à flexão para a classificação estrutural do *Pinus* spp. pela norma brasileira NBR 7190-2 (ABNT, 2022b).

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
ρ_{12} (kg/m ³)	600	400	350
MOE (kPa·mm ²)	11,0	8,0	5,0
MOR _k (MPa)	35	27	14

ρ_{12} – densidade média; MOE - Módulo de elasticidade médio à flexão; MOR_k - resistência característica à flexão.

2.11 AVALIAÇÃO DA MADEIRA POR PROCESSAMENTO DE IMAGEM

O processamento de imagens para avaliar a madeira, no caso, anéis de crescimento, remonta ao ano 1986 (ROSOT *et al.*, 2003). A técnica já foi testada e comprovada por ser eficiente e mais rápida do que a técnica manual, conforme descrito em estudos anteriores utilizando diferentes *softwares* (ROSOT *et al.*, 2003; NUTTO *et al.*, 2012; MACHADO *et al.*, 2013).

Na técnica manual se utiliza uma régua métrica para medir os raios dos anéis, contudo, Machado *et al.* (2013) afirma que isso limita o tamanho do raio a uma determinada marca de milímetro. Pois, se o raio do anel terminar entre duas marcas de milímetro na régua, deve-se optar pela marca mais próxima. Podendo ocasionar diferenças principalmente nos primeiros raios de crescimento.

Já no processamento de imagem digital, há a possibilidade de maior precisão, pois o zoom na imagem facilita a aproximação e melhor observação dos limites avaliados (NUTTO *et al.*, 2012; MACHADO *et al.*, 2013). No mercado, há uma forte tendência para o uso de processamento de imagem para obtenção de dados, pois a técnica apresenta como vantagens a maior rapidez e a desnecessidade de retirar o material do campo (ROSOT *et al.*, 2003 e MACHADO *et al.*, 2013).

Ao utilizar o processamento de imagem para avaliar a área transversal do tronco em discos de madeira verde, Rosot *et al.* (2003) tiveram resultados com diferenças de 7% entre o método manual e o método por imagem. Os autores atribuíram a diferença ao fato de que os discos para o processamento de imagem eram verdes, enquanto os discos para a técnica manual eram secos e lixados, podendo ter ocorrido alguma contração da madeira no momento da secagem, indicando que ao excluir esse fator, não ocorre diferenças entre as duas técnicas.

Machado *et al.* (2013) avaliou a madeira de *Pinus taeda* em diferentes alturas utilizando fotos com seis megapixels e 314 dpi. Os autores afirmaram que as características da foto, permitiram uma boa aproximação (zoom) para visualização e marcação dos limites, sem a necessidade de alterar o contraste, nitidez ou brilho da imagem. Ao comparar com a técnica manual, os autores também concluíram que não ocorrem diferenças entre as duas técnicas.

Nutto *et al.* (2012) observaram que quanto mais visíveis forem os limites, como os anéis de crescimento, para definir o início e fim da avaliação, mais fácil é o processamento da imagem. Essa condição é facilmente observada nas coníferas, como no *Pinus taeda*. Os autores também utilizaram fotos com 6 megapixels e não encontraram diferenças entre as técnicas utilizadas.

Os estudos indicaram que o uso de imagens com boa qualidade é eficaz para demarcar limites nos discos de madeira no processamento de imagem digital, independentemente do software utilizado.

2.12 DESDOBRO E RENDIMENTO DO *Pinus taeda*

O processo de transformação da tora em peças menores de secção retangulares e/ou quadradas, realizado em serrarias, é chamado de sistema de desdobro. O seu rendimento é a relação entre o volume de madeira serrada e o volume de toras necessário para produzi-los (VITAL, 2008).

O rendimento varia segundo a classe diamétrica, o tipo de produto desejado e a metodologia de desdobro. Esta última, quando aplicada em toras da mesma classe diamétrica, pode determinar o maior ou o menor rendimento da matéria-prima, bem como, ser mais eficiente para uma determinada classe do que em outra. Dessa forma, é possível analisar e programar a melhor metodologia de desdobro para uma determinada classe para obter o maior rendimento possível, e isso é um fator economicamente importante (MURARA JUNIOR; ROCHA; TIMOFEICZYK, 2010; DOBNER JUNIOR; HIGA; ROCHA, 2012; MURARA JUNIOR; ROCHA TRUGILHO, 2013).

Há duas metodologias de desdobro de toras denominadas por Leite (1994) como convencional e programada. Na convencional, na maioria das vezes o sistema de corte tangencial é utilizado tentando obter o maior número de peças. Já a programada é caracterizada por um sistema de corte previamente pensado, objetivando a máxima utilização da tora.

Em grande parte das serrarias de pequeno e médio porte no Brasil, cuja principal matéria-prima é o gênero *Pinus*, grande parte das toras apresenta diâmetros menores que 30 cm (VITAL, 2008). Isso é refletido nos estudos de desdobro, cuja maioria avalia toras com pequenos diâmetros e uma minoria

estudou o desdobro em toras com diâmetros maiores que 40 cm (BIASI; ROCHA, 2003; MURARA JUNIOR; ROCHA; TIMOFEICZYK, 2005; DOBNER JUNIOR; HIGA; ROCHA, 2012).

Além de propiciarem um maior rendimento quando comparado com toras de menor diâmetro (VIANNA NETO, 1984; MANHIÇA, 2010), as toras de maior diâmetro fornecem madeira sólida de maior qualidade e com maior valor percebido pelo mercado consumidor (DOBNER JUNIOR; HIGA; ROCHA, 2012). Normalmente, essas toras de grande diâmetro são destinadas a nichos específicos no mercado que buscam por matéria-prima superior, como o mercado de produtos estruturais, que valoriza a madeira com melhor qualidade.

Como já mencionado, há poucos estudos sobre o desdobro em toras de grande diâmetro e muitos deles avaliam apenas o rendimento e custos de multiprodutos, como exemplos Murara Junior, Rocha e Truguilho (2013), Dobner Junior, Higa e Rocha *et al.* (2012).

Murara Junior, Rocha e Truguilho (2013) determinaram o rendimento do *Pinus taeda* serrado em uma serraria de médio porte, com cinco diferentes classes diamétricas, cuja variação do diâmetro foi de 18 a 44 cm. Duas metodologias de desdobro foram aplicadas, uma convencional e uma programada. Na metodologia programada, o rendimento médio foi de 53,6%, 9,4 pontos percentuais acima do rendimento médio no desdobro convencional. Para a classe diamétrica de maior diâmetro (38,1 a 44 cm) o rendimento médio foi de 63,6% para o desdobro programado, sendo que este, foi de 17 pontos percentuais, maior que o desdobro convencional realizado na mesma classe.

Dobner Junior *et al.* (2012) afirmam que estudos de rendimento utilizando toras com diâmetro acima de 50 cm são raros. Os autores avaliaram o rendimento de sete classes diamétricas de *Pinus taeda*, variando de 20 a 57 cm de diâmetro. Para o rendimento, sete tipos de produtos diferentes foram considerados, com larguras variando de 100 a 300 mm, espessura de 25 mm e comprimento de 3000 mm. Os autores obtiveram os maiores rendimentos para as maiores classes diamétricas, com médias acima de 73% para as classes com diâmetros superiores a 45 cm. Classes diamétricas entre 35 e 45 cm de diâmetro obtiveram rendimentos médios aproximados de 61% a 71%. Já as classes com menor diâmetro de 20 a 35 cm, o rendimento variou de aproximadamente 39% a 48%.

Contudo, estudos que avaliem o desdobro em toras de grande diâmetro, prezando a qualidade final da madeira destinada a consumidores específicos, como o nicho de produtos estruturais em madeira, são escassos ou ausentes.

2.13 MÉTODOS DE ANÁLISE PARA DEMARCAÇÃO DOS LENHOS

A mudança entre os lenhos juvenil e adulto não é abrupta. Isso foi verificado por estudos baseados no comprimento do traqueóide (BALLARIN; PALMA, 2003). Os autores determinaram que o lenho juvenil é formado até o 14.º ano de crescimento e o lenho adulto é formado a partir do 18.º ano de crescimento para a espécie do *Pinus taeda*.

Zobel *et al.* (1971) observaram uma estabilização do comprimento dos traqueóides entre o 11-13.º anel de crescimento no *Pinus taeda* e concluíram que até o 12.º anel, a madeira é formada de lenho juvenil. Bendsten e Senft (1986) indicaram que o lenho adulto só é formado após o 14.º anel de crescimento.

Para o *Pinus elliottii*, Palermo *et al.* (2013) determinaram o intervalo de crescimento do lenho juvenil pelo comprimento dos traqueóides, cuja formação se estende da medula até o 7.º anel de crescimento e o lenho adulto é formado a partir do 23.º anel de crescimento. Quando os autores utilizaram a densidade para determinar as transições, o lenho adulto foi considerado após 17 anéis de crescimento em relação à medula.

Com os exemplos de estudos mencionados, se verifica que o comprimento dos traqueóides apresentou boa correlação com a idade e por isso, foi utilizado na segregação dos lenhos. Adicionalmente, ao segregar os lenhos com base nessa propriedade, os estudos acima ainda a correlacionaram com outras propriedades da madeira, como a densidade, rigidez e resistência. Assim, utilizando o método limiar proposto por Clark, Daniels e Jordan (2006) é possível comparar valores específicos e previamente escolhidos entre os estudos.

Complementarmente, tomando como base o comprimento dos traqueóides dos estudos mencionados acima, reforça-se a dificuldade de determinar um ponto exato da mudança do lenho juvenil, que não é abrupta.

Isso dificulta a escolha de um ponto exato na hora de delimitar o início e término dos lenhos juvenil e adulto. Para tal, deve-se considerar outros fatores, como os métodos silviculturais praticados pelo setor e o tipo de produto a ser processado com essa madeira.

Um dos métodos praticados na silvicultura é o desbaste. O momento do primeiro desbaste pode variar devido às condições do sítio e o espaçamento adotado. Mas estudos e empresas indicam que o primeiro desbaste deve ocorrer entre seis e oito anos (INOUE *et al.*, 2011; MAINARDI; SCHNEIDER; FINGER, 1996; KOHLER *et al.*, 2015; DAVID *et al.*, 2017; GATEADOS, 2022). O segundo desbaste varia conforme o destino do produto, mas há estudos que afirmam ocorrer em torno dos 12 anos (ACERBI JR *et al.*, 1999; MAINARDI; SCHNEIDER; FINGER, 1996).

As dimensões do produto final também influencia na escolha da metodologia. Tendo em vista que as dimensões variam entre empresas, tomou-se como base uma espessura de 1 pol. (2,54 cm) e seus valores múltiplos, a exemplo de Dobner Jr *et al.* (2012) que estudou o rendimento da produção de produtos de madeira com tamanhos variados. Além disso, um grande número das empresas produtores de MLCC (PFEIFER, 2022; SCHILLIGER HOLZ, 2022; RUBNER HOLZBAU, 2018; HASSLACHER NORICA TIMBER, 2022) utilizam tábuas com espessuras de 20 a 25 mm para pelo menos um dos tipos de painéis fabricados.

Portanto, a separação a cada seis anéis de crescimento apresentou uma área suficiente para compreender a maior quantidade de informações possíveis, baseados nos estudos mencionados acima. Já que seus múltiplos (12, 18, 24, etc.) ocorrem em idades pontuais de mudança de lenhos, desbaste ou apresentam uma largura suficiente para o corte da tora em pranchões e/ou tábuas.

2.14 MÉTODO LIMIAR

Dado a dificuldade e trabalhabilidade de se definir a idade de demarcação entre o lenho juvenil e lenho adulto, Clark, Daniels e Jordan (2006) desenvolveram um método para determiná-la. Os autores comentam que como as propriedades da madeira tem mudança gradual e não abrupta e que elas

podem apresentar maturação em diferentes épocas, torna-se oneroso determinar esse limite por avaliações demoradas, como o comprimento dos traqueóides.

Os autores comentam que muitos métodos têm sido utilizados para demarcar a idade de transição do lenho juvenil para o lenho adulto. O método mais simples é chamado de método limiar, do inglês *threshold*, ou método gráfico. Nesse método, um valor é selecionado nos gráficos para definir quando uma propriedade alcançou a fase de lenho adulto.

Assim, gráficos de uma propriedade em relação à idade partindo da medula são visualmente avaliados para localizar a idade limite. Isto é baseado na curva do gráfico quando o valor da propriedade alcança o valor limite estabelecido para ser considerado lenho adulto. A segunda possibilidade neste método consiste em usar modelos de regressão linear segmentados para estimar a idade de demarcação.

O método limiar tem a vantagem de que o lenho adulto pode ser definido por um valor específico mínimo para uma determinada propriedade. Normalmente, essa propriedade e valor é relacionada com as propriedades desejadas do produto final, visto que esse método de segmentação define o lenho adulto baseado na taxa de mudança da propriedade.

Então, ao tomarmos como exemplo o valor mínimo de uma propriedade física ou mecânica de alguma norma, podemos demarcar a partir de que idade aquela madeira tem as características mínimas requeridas.

Embora seja uma forma simples de avaliação, o estudo conduzido por Clark, Daniels e Jordan (2006) foi muito difundido entre outros pesquisadores. Sendo este, um método muito utilizado para demarcar os diferentes tipos de lenho presentes na madeira, como os exemplos de estudos conduzidos por Antony *et al.* (2011), Mansfield *et al.* (2009), Darmawan *et al.* (2013), Samuelson *et al.* (2013), Dahlen *et al.* (2018), Dobner Junior, Huss e Tomazello Filho (2018), entre outros.

3 MATERIAL E MÉTODOS DA QUALIDADE DA MADEIRA

No Apêndice 1 podem ser verificadas as etapas executadas nesse tópico, suas relações e ordem de execução.

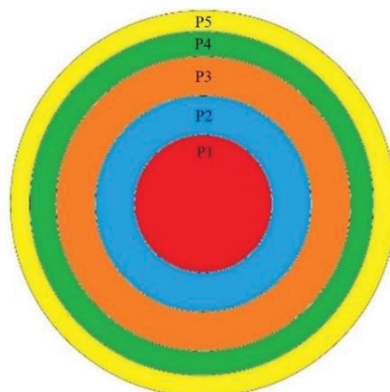
3.1 PREPARAÇÃO DO MATERIAL

Para este estudo, quarenta toras de *Pinus taeda* foram doadas por uma serraria em Capão Alto, Santa Catarina, Brasil. As toras para a serraria eram provenientes de florestas plantadas localizadas em Campo Belo do Sul, Santa Catarina, Brasil. A latitude da área é 27° 53' 55" S e longitude 50° 45' 26" W, com classificação de Köppen Cfb, com temperaturas máximas em média de 21°C e mínimas de 12°C e precipitação anual média de 1406 mm.

Os métodos iniciaram com a tomada de fotografias dos topos para posterior análise de imagem. Em seguida, a contagem dos anéis de crescimento foi realizada na direção medula – casca. A cada seis anéis de crescimento foi feito uma marca com tinta, em seguida, com tinta aerossol para madeira, a área total correspondente aos seis primeiros anéis de crescimento, incluindo a medula, foi pintada com vermelho (P₁). O mesmo processo foi executado para os anéis de crescimento seguintes, sempre com o intervalo de seis anos. Para a área transversal da tora correspondente aos anéis de 6,1-12 anos foi pintado com azul (P₂); o laranja (P₃) foi no intervalo de 12,1-18; entre 18,1-24 o verde (P₄) e nos anéis restantes entre 24,1 e 30 anos de amarelo (P₅) (Figura 2).

A escolha de seis anos para demarcar os lenhos conciliou informações de estudos sobre a delimitação do lenho juvenil pelo comprimento dos traqueóides (BALLARIN; PALMA, 2003; ZOBEL *et al.*, 1971; BENDSTEN; SENFT, 1986; PALERMO *et al.*, 2013), a idade média para o primeiro e segundo desbaste praticado pelas empresas (MAINARDI; SCHNEIDER; FINGER, 1996; ACERBI JR *et al.*, 1999; INOUE *et al.*, 2011; KOHLER *et al.*, 2015; DAVID *et al.*, 2017; GATEADOS, 2022) e as dimensões do produto final nos desdobros praticados na região de Lages e por empresas de MLCC (DOBNER JR; HIGA, ROCHA, 2012; PFEIFER, 2022; SCHILLIGER HOLZ, 2022; RUBNER HOLZBAU, 2018; HASSLACHER NORICA TIMBER, 2022).

Figura 2 - Posições radiais na área transversal das toras a cada seis anéis cambiais.



Fonte: A Autora (2023).

A demarcação de seis anos também visa facilitar a avaliação, uma vez que a área colorida é maior. Por consequência, o processo de coloração na área transversal se tornou mais simples. Isso também auxiliou na coloração das áreas P₄ (verde) e P₅ (amarelo). Nessas áreas de lenhos adultos a distância entre os anéis de crescimento é menor, e a área que deve ser colorida, como resultado, também se torna menor. Em questões práticas, a distância de seis anéis de crescimento facilitou a retirada de corpos de prova para avaliações destrutivas, tendo área suficiente para retirar o material de acordo com cada lenho.

A sequência das cores foi escolhida para evitar a mistura de cores quentes ou frias entre si, como o Vermelho e Laranja. A sequência foi iniciada com uma cor quente e em seguida uma cor fria, e assim por diante. As toras foram pintadas um a dois dias antes do desdobro, a fim de ter tempo suficiente para secar a tinta.

Das 40 toras, cinco possuíam um diâmetro entre 250 e 350 mm (sortimento menor); cinco tinham entre 350 e 450 mm (sortimento médio); e 30 tinham diâmetro entre 430 e 550 mm. O comprimento das toras variou de 3050 a 3090 mm. Os diâmetros foram em função da disponibilidade e tamanhos ofertados pela empresa fornecedora da matéria-prima e da serraria. Na Tabela 6 estão apresentados o número de toras em cada sortimento com o respectivo desdobro utilizado. As toras dos sortimentos B e C, destinadas à serraria, são

terceiras e quartas toras, uma vez que a maioria das primeiras e segundas toras são destinadas à indústria de laminação.

Tabela 6 - Número de toras desdobradas nos sortimentos com seus diâmetros médios e a identificação do diagrama de desdobro.

Sortimento	Número de toras	Diâmetro	Tipo de desdobro	Código de identificação
A	15	430 – 550 mm	1 (Figura 3a)	A-1
A	15	430 – 550 mm	2 (Figura 3b)	A-2
B	5	350 – 450 mm	2	B-2
C	5	250 – 350 mm	2	C-2

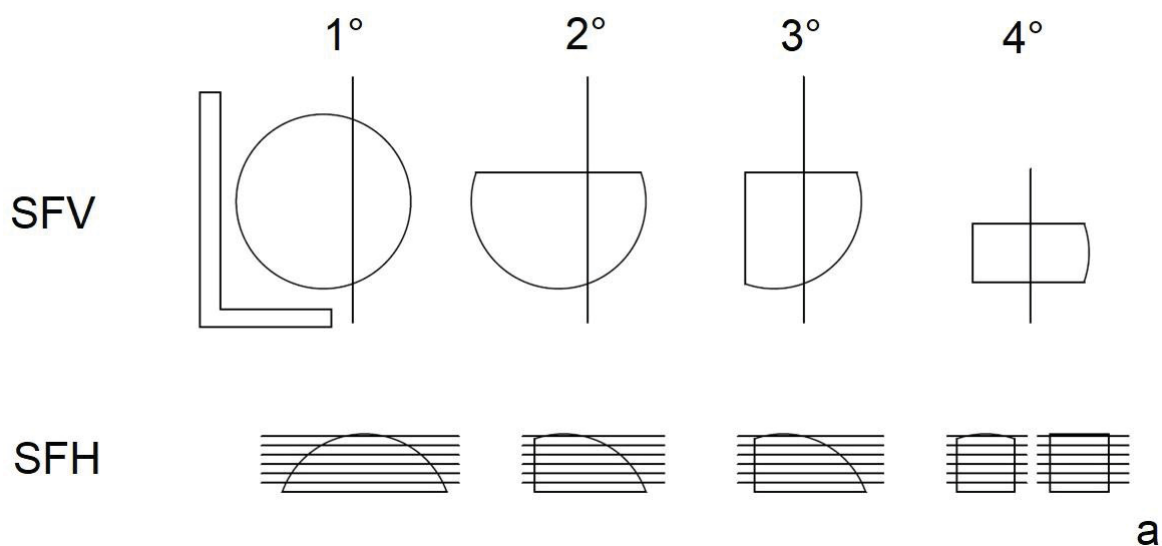
O diâmetro médio das toras foi obtido pela razão entre a circunferência e número π (pi). A média das circunferências foi determinada pelas medidas da ponta fina e da ponta grossa de cada uma das toras.

Dois sistemas de desdobros foram implementados de modo a obter as medidas comerciais das tábuas praticadas pela serraria, cujas dimensões foram de 24 × 150 × 3060 mm e 24 × 100 × 3060 mm (espessura, largura, comprimento). No primeiro desdobro objetivou-se obter a maior quantidade de tábuas compostas por lenhos mais velhos, limitando o miolo (lenho juvenil) ao máximo possível. No segundo desdobro, o qual é o praticado pela serraria, se priorizou o maior rendimento. Ambos os sistemas de desdobros foram executados com uma serra fita vertical, duas serras fitas horizontais e um refilador. Na Figura 3 estão ilustrados os diagramas de desdobro.

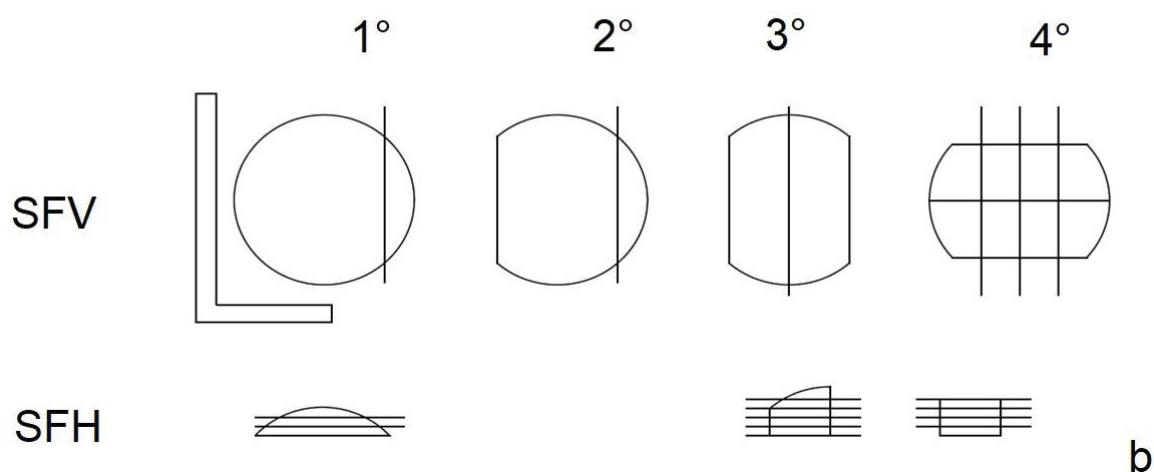
Antes de entrarem na linha do desdobro, as toras foram identificadas em um dos topos por cores diferentes, visando o rastreio das tábuas após o desdobro.

Figura 3 - Diagramas dos desdobros 1, tangenciando os anéis de crescimento e o desdobro 2 para retirada do bloco central.

1º desdobro



2º desdobro



SFV – serra fita vertical; SFH – serra fita horizontal.

Fonte: A autora (2023).

Em seguida, as tábuas seguiram para a estufa de secagem, com programação visando o teor de umidade final de 10%. O programa da estufa também seguiu o utilizado pela empresa. Para manter o controle na estufa, oito pares de eletrodos foram inseridos na madeira. Após a secagem, a madeira foi

transportada para o laboratório de Materiais na Universidade do Estado de Santa Catarina, no Centro de Ciências Agroveterinárias, em Lages, SC.

3.2 MENSURAÇÃO DAS DIMENSÕES DAS TÁBUAS

Todas as tábuas (n=1056) tiveram suas dimensões medidas, espessura, largura e comprimento. Para a espessura foi utilizado um paquímetro digital e a largura e comprimento foram medidos com uma trena. Na espessura e largura, três medidas foram tomadas, uma, no centro das tábuas e duas, a aproximadamente 150 mm das extremidades, o comprimento foi medido na parte central. Em seguida, foi calculado a média para cada tábua.

Essas informações serviram de base para o cálculo do rendimento e para o cálculo do módulo de elasticidade à flexão não destrutivo. Ambos os procedimentos serão explicados mais adiante.

3.3 RENDIMENTO

O rendimento em percentual foi calculado pela equação 1, para cada tora em seus respectivos desdobros (Tabela 7). No cálculo do rendimento, foram considerados apenas os produtos que apresentavam as dimensões comerciais para produção de elementos estruturais. Assim, os refilos não foram contabilizados nesta avaliação, por serem considerados perda.

$$Rendimento(\%) = \left(\frac{\text{volume de madeira serrada}}{\text{volume da tora}} \right) * 100 \quad \text{Equação 1}$$

No Sortimento A, entre os desdobros 1 e 2 foram comparadas as informações de rendimento e o percentual de tábuas com as dimensões de 150 mm e 100 mm. Para isso, as médias das informações em cada tora foram testadas para averiguar a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Com as variâncias homogêneas, seguiu-se para o teste T (Student), para comparar as médias das duas amostras independentes, desdobro 1 e desdobro 2. Ambos os testes foram executados com nível de significância de 5%.

3.4 ANÁLISE POR IMAGEM DA ÁREA TRANSVERSAL DAS TORAS

Antes do processo de desdobro, os topos foram fotografados para realizar a análise por imagem da área transversal das toras. No total, 40 toras tiveram uma das pontas analisadas por imagem. Para essa etapa, utilizou-se uma máquina fotográfica Canon modelo EOS Rebel T5, com lente EF-S, abertura 18 – 55 mm. A distância entre o topo da tora e da lente da máquina foi aproximadamente de 800 mm. O f/stop foi de f/5.6, ISO de 3200 e o tempo de exposição variou entre as toras devido ao ajuste automático da máquina fotográfica. As fotografias tinham 72 dpi e 5184×3456 píxeis.

Em seguida, as fotografias foram exportadas para um computador, e então, exportadas para o *software* de imagem ImageJ. Os passos da análise (Figura 4) foram executados na seguinte ordem:

(a) a escala foi delimitada no *software*, com base no perímetro medido na ponta da tora no pátio da serraria;

(b) a linha um foi traçada na horizontal entre as duas extremidades do fuste, cortando a medula.

(c) a linha dois foi traçada a $90.^{\circ}$ da primeira;

(d) as linhas três e quatro foram traçadas de modo a estarem a $45.^{\circ}$ entre a linha um e dois, com esses dados, calculou-se o diâmetro médio da tora;

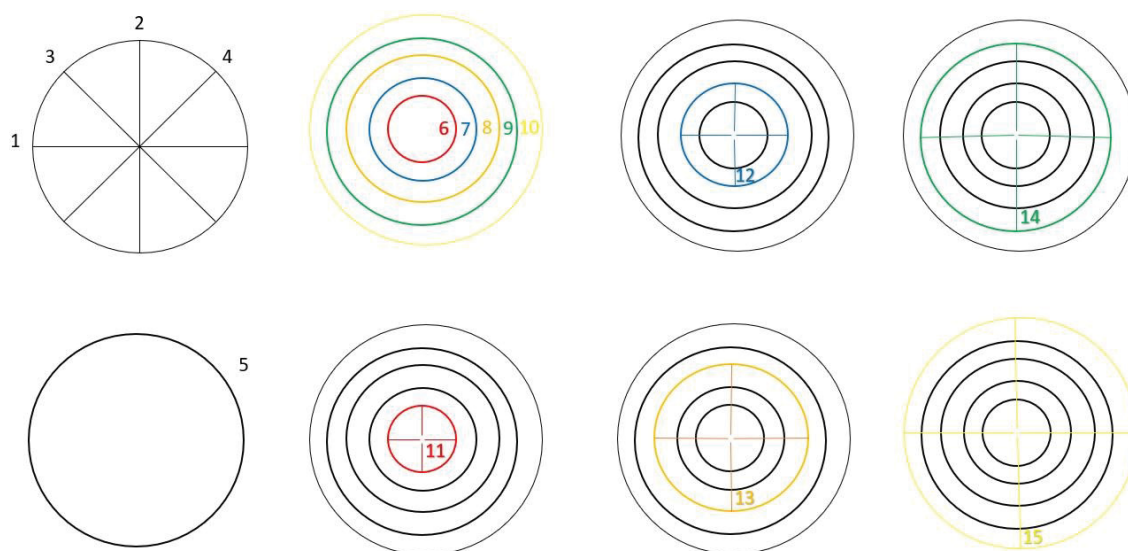
(e) o perímetro da tora foi delimitado pela linha cinco;

(f) as linhas entre seis e 10 demarcaram os perímetros de cada lenho, sendo a linha seis para os primeiros seis anéis de crescimento (que correspondem ao lenho Vermelho – $P_{,1}$). A linha sete para o anel correspondente ao $12.^{\circ}$ ano de crescimento (Azul – $P_{,2}$), a oito para o $18.^{\circ}$ anel (Laranja – $P_{,3}$), a nove para o $24.^{\circ}$ anel (Verde – $P_{,4}$) e a 10 para o $30.^{\circ}$ anel de crescimento (Amarelo – $P_{,5}$). Neste passo, foram verificados a existência de falsos anéis de crescimento e excluídos quando presentes;

(g) para determinar a distância da medula até a periferia do lenho, quatro medidas do raio foram efetuadas, sendo as linhas 11 correspondentes ao raio até o $6.^{\circ}$ anel de crescimento, 12 para o $12.^{\circ}$ anel de crescimento, a 13

para o 18.º, a 14 para o 24.º anel e 15 para o 30.º anel de crescimento. Durante a medida de todas as linhas, quando necessário, o zoom foi aplicado diretamente no programa para melhor visualização dos limites avaliados.

Figura 4 – Sequência da análise de imagem digital para a determinação de características da tora no programa ImageJ.



Linhas 1 a 4 – diâmetro médio; 5 – perímetro; 6 a 10 – perímetro a cada seis anéis de crescimento; 11 a 15 – raio de crescimento médio.

Fonte: A autora (2023).

Com esses dados foram calculados o diâmetro médio para: (a) o raio médio para cada seis anos de crescimento; (b) a espessura do lenho a cada seis anos; (c) a área de cada lenho na tora em relação à área transversal total.

O diâmetro médio das toras foi obtido pela média do comprimento das linhas um a quatro pelo *software* ImageJ. A área total para os lenhos foi calculada diretamente pelo *software*. O raio médio foi determinado pelo comprimento das linhas correspondentes para cada lenho. A espessura do lenho a cada seis anos foi determinada pela diferença entre o lenho mais externo e o interno. Por exemplo, para determinar a distância do lenho $P_{2,2}$, correspondente a área entre os 6.º e o 12.º anel de crescimento, fez-se a diferença do comprimento médio dos raios $P_{2,2}$ (12) pelo comprimento médio dos raios $P_{1,1}$ (11). Para a quantidade de área de cada lenho, foi calculada a sua porcentagem em relação à área total transversal da tora.

3.5 QUALIDADE DAS TÁBUAS

3.5.1 Determinação da área de lenho em relação à área transversal total nas tábuas

As tábuas foram separadas por tora e ordenadas para fotografar a área transversal. Objetivando diminuir possíveis erros, a sequência das tábuas foi sempre ascendente (tábua 1 a tábua i). Uma escala com uma medida conhecida foi adicionada em todas as fotos das áreas transversal para auxiliar na calibração do *software* (Figura 5).

Figura 5 - Exemplo de fotografia para análise de imagem no software ImageJ.



No exemplo estão as peças das áreas transversais das tábuas com a escala (régua graduada) ao lado direito.

Fonte: A autora (2023).

O *software* ImageJ foi utilizado para calcular a proporção das cores em cada uma das áreas transversais das tábuas. O procedimento para cálculo da área foi conforme os passos seguintes:

(a) as fotografias foram tomadas para as peças transversais. Todas as fotos foram tiradas em máquina fotográfica Canon modelo EOS Rebel T5, com lente EF-AS, a máquina foi posicionada perpendicularmente às peças;

(b) em cada fotografia analisada a escala foi calibrada para evitar erros de cálculo;

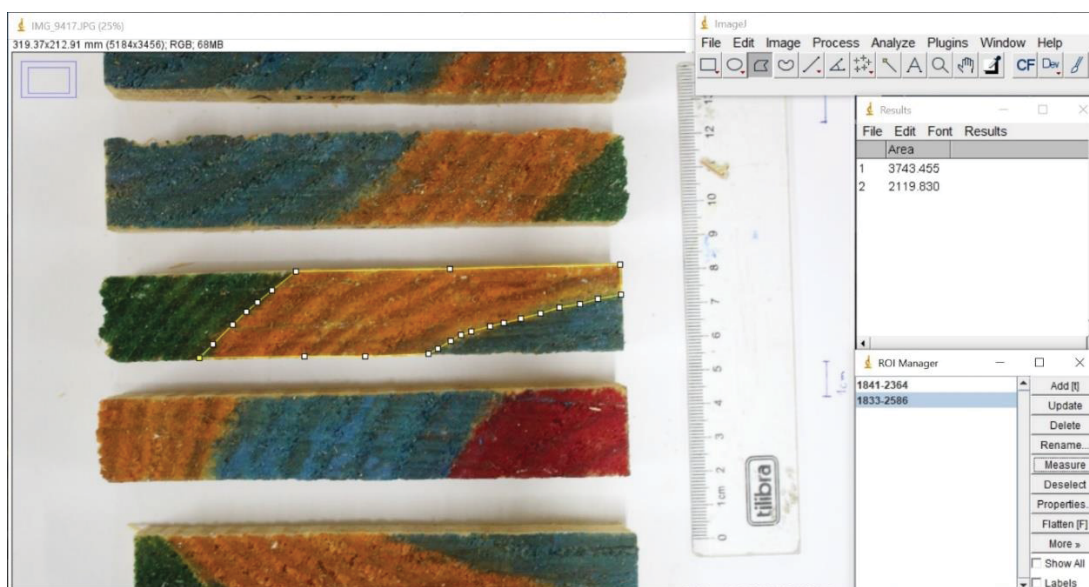
(c) a área total da direção transversal foi selecionada manualmente e calculada pelo *software*;

(d) a área transversal para cada cor presente nas tábuas foi selecionada manualmente e em seguida, também foi calculada pelo *software*;

(e) a área correspondente a cada cor na tábua foi calculada em relação à área total pela regra de três simples.

Na Figura 6 a interface de uma tábua marcada com sua respectiva área e a janela de cálculo da área estão ilustrados.

Figura 6 - Exemplo de uma área transversal delimitada no software ImageJ.



A linha amarela marca a área de lenço para medir a sua proporção em relação à área total da seção transversal. Na parte direita da imagem tem-se os valores do perímetro da área calculados pelo software.

Fonte: A autora (2023).

3.5.2 Densidade aparente das tábuas estruturais

A densidade aparente das tábuas foi determinada no teor de umidade médio de 12%. Todas as tábuas foram pesadas em balança digital e com as

dimensões determinadas no item 3.2 foi calculada a densidade. A norma europeia EN 384 (EN, 2004), indica que a densidade aparente seja calculada pela ISO 13061-2, para qualquer peça com formato geométrico diferente de um prisma, desde que seja possível medir as dimensões com precisão. Ainda segundo a norma EN 384 (EN, 2004), a densidade aparente característica do lote deve ser calculada pela equação 2.

$$\rho_{05} = (\rho_m - 1,65s) \quad \text{Equação 2}$$

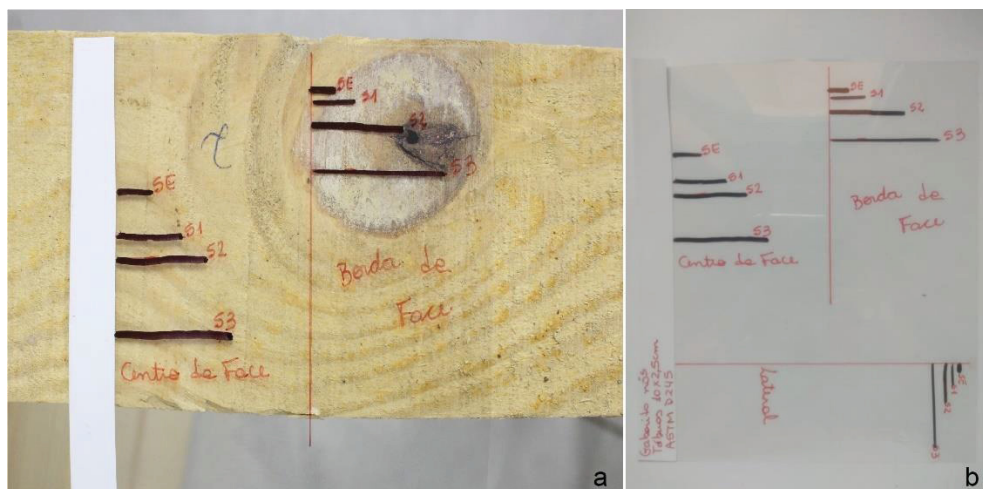
Em que: ρ_{05} é a densidade característica; ρ_m é a densidade média; e s é o desvio padrão da amostra.

Após calcular a densidade aparente média e a densidade aparente característica foi atribuído a cada um dos sortimentos a classe de resistência referente à densidade aparente característica pela EN 338 (EN, 2016a) e a classe de resistência média referente à densidade aparente pela ABNT NBR 7190 (ABNT, 2022). O percentual de tábuas classificadas dentro de cada classe pela EN 338 (EN, 2016) e pela ABNT NBR 7190 (ABNT, 2022) também foram calculados para cada sortimento.

3.5.3 Classificação visual das tábuas

A classificação dos nós seguiu a metodologia apresentada na norma ASTM D 245 (ASTM, 2019) e por Carreira e Dias (2005). Isso foi devido ao uso em pesquisas brasileiras e pela possibilidade de especificação dos resultados em função da área da seção transversal da madeira com base nos valores lineares da norma EN 14081-1 (EN, 2016b). O processo foi facilitado com o auxílio de gabaritos, com as dimensões máximas permitidas em cada classe estrutural (Figura 7). Como as tábuas apresentavam duas larguras, 100 e 150 mm, dois gabaritos foram confeccionados. A espessura de 25 mm foi a mesma nos dois casos.

Figura 7 – Tábua com largura de 100 mm (a) com um nó fora dos limites aceitos, classificado visualmente com o auxílio de um gabarito (b).



Fonte: A autora (2023).

A classificação foi em função do nó mais limitante presente na tábua, e.g., uma tábua com a presença de três nós, em que dois apresentam classificação SE e um nó apresenta classificação S2, foi classificada como S2.

Fissuras e rachaduras foram desconsideradas, visto que a madeira apresentou pequenas fissuras superficiais e próximo às bordas, não impactando nas propriedades mecânicas.

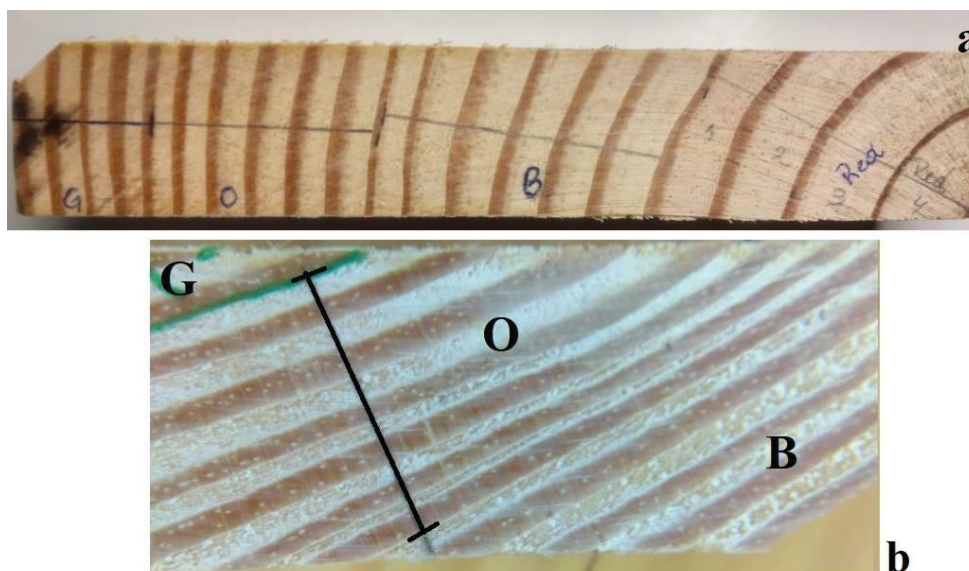
3.5.4 Anéis de crescimento na área transversal

No método de classificação visual proposto por Carreira e Dias (2005) baseado no *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB), a classificação dos anéis de crescimento ocorre pelo número de anéis de crescimento presentes em 25 mm de comprimento na seção transversal da madeira. Pela quantidade presente de anéis, a madeira será classificada como densa (D) ou não-densa (ND).

Devido à alta heterogeneidade presente nas madeiras de *Pinus*, os anéis de crescimento apresentam larguras variadas entre os lenhos iniciais e tardios. Para tal, as posições radiais foram avaliadas pelas suas respectivas áreas transversais presentes das tábuas.

Para essa avaliação 100 tábuas foram escolhidas aleatoriamente do lote e seus topos foram cortados com 25 mm de comprimento com uma destopadeira. Os anéis de crescimento correspondentes a cada posição foram identificados e marcados. As medidas dos lenhos inicial e tardio foram realizadas individualmente e tangenciando cada anel de crescimento. Para a medição utilizou-se uma régua e uma lupa de aumento de 10x (Figura 8). O número de anéis de crescimento variou conforme os tipos de lenho presentes em cada tábua. Tábuas que apresentaram distorção dos anéis de crescimento, ocasionados por nós próximos às extremidades, foram excluídas da análise devido à impossibilidade de medir os anéis com precisão.

Figura 8 - Área da seção transversal marcada para as medidas dos anéis de crescimento (a) e detalhe do aumento da lupa 10 x (b).



Fonte: A Autora (2023).

Com posse das larguras dos lenhos inicial e tardio, calculou-se:

(a) a razão entre o lenho inicial e tardio, sendo denominado i:t (Eq. 3);

$$i:t = \frac{\text{largura lenho inicial}}{\text{largura lenho tardio}}$$

Equação 3.

(b) a quantidade de lenho inicial por tipo de lenho/posição foi calculada em função da soma das larguras dos anéis de lenho inicial, dividido pela soma

das larguras dos lenhos inicial e tardio presentes e apresentados em porcentagem (Eq. 4). Para o lenho tardio, utilizou-se a somatória das larguras dos lenhos tardios (Eq. 5), sendo denominadas %inicial e %tardio, respectivamente;

$$\%inicial = \frac{\sum Largura\ inicial}{\sum largura\ total} * 100 \quad \text{Equação 4.}$$

$$\%tardio = \frac{\sum Largura\ tardio}{\sum largura\ total} * 100 \quad \text{Equação 5.}$$

3.5.5 Classificação mecânica das tábuas

A classificação mecânica foi em função do MOE. As tábuas foram avaliadas no teste de flexão não destrutivo à três pontos. Um teste preliminar foi executado em 15 tábuas para determinar o carregamento máximo. Esse procedimento objetivou que todo o deslocamento das tábuas ficasse na zona elástica, sem que ocorresse qualquer deformação permanente da madeira.

Os resultados preliminares indicaram que devido à diferença da densidade da madeira nos sortimentos, e à largura das tábuas, as forças de carregamento nos sortimentos B e C foram de 90 N para as tábuas de 150 mm e 80 N para as tábuas de 100 mm de largura. No sortimento A as forças de carregamento foram de 70 N e 40 N para as tábuas de 150 mm e 100 mm de largura, respectivamente.

O vão entre os suportes no teste foi de 2720 mm para todas as tábuas, já que a variação do comprimento foi de 3050 a 3090 mm. Os deslocamentos foram mensurados por um transdutor de deslocamento elétrico (modelo WA® 50 mm), acoplado a um sistema de aquisição de dados (Quantum-X®), cujo *software* Catman Easy® da empresa HBM® tem precisão de doze casas decimais.

O deslocamento das tábuas foi determinado no ponto central, no sentido de menor inércia, uma vez em cada lado da tábua. Primeiramente, o transdutor foi colocado na tábua sem carregamento e sua posição foi zerada no software. Em seguida, aplicou-se o carregamento e esperou-se que o deslocamento estabilizasse, tendo assim o valor do deslocamento em um dos

lados da tábua. Então, a tábua foi virada e o procedimento foi repetido, obtendo-se o segundo valor do deslocamento. Com o deslocamento médio, o valor de carregamento para cada sortimento e largura da tábua e a inércia, o MOE foi calculado conforme a equação 6.

$$MOE (MPa) = \frac{F L^3}{48 D_x I} \quad \text{Equação 6.}$$

Em que: MOE = Módulo de elasticidade em MPa; F = força de carregamento aplicada no meio do vão em N; L = vão entre os suportes em mm; D_x = Deslocamento médio da tábua em mm; I = Momento de inércia da tábua em mm⁴.

3.6 CLASSIFICAÇÃO NAS NORMAS EUROPEIA E BRASILEIRA PARA MADEIRA ESTRUTURAL

As normas utilizadas para a classificação foram a norma europeia EN 338 (EN, 2016), a norma brasileira NBR 7190 – 2 (ABNT, 2022b).

Com a classificação mecânica pelo módulo de elasticidade, as tábuas foram enquadradas nas classes de resistência nas diferentes normativas para madeira estrutural. Em seguida, o percentual de tábuas classificadas dentro de cada classe e norma foram calculados nos sortimentos e desdobros.

Adicionalmente, pela norma europeia foram determinados o MOE médio para os sortimentos/lotes A (A-1 e A-2), B e C, sendo atribuídas as classes de resistências. Pela norma brasileira NBR 7190-2 (ABNT, 2022b) foram determinadas as classes de resistência pelo MOE médio dos sortimentos.

3.7 CORRELAÇÕES

Para identificar o momento em que o valor do MOE começa a diminuir em relação à proporção de lenho juvenil e a do lenho adulto, utilizou-se um gráfico de dispersão dos dados com o ponto de interseção entre os lenhos juvenil e adulto. O ponto foi definido no cruzamento entre as linhas de

tendência. Uma correlação de Pearson com 5% de significância foi realizada entre as variáveis de Posição x MOE e de Posição X Densidade.

3.8 MODELOS MÚLTIPLOS LINEARES

Primeiramente, os dados foram avaliados para identificar a possível presença de *outliers*. Quando presentes, eles foram retirados da análise de modelos múltiplos lineares.

Nesta etapa, dois modelos genéricos foram usados. No primeiro (Eq. 7) se utilizou os possíveis conjuntos de posições/lenho presentes nas tábuas (Eq. 8). No segundo modelo, se considerou as posições individuais na tábua. As variáveis independentes foram representadas pela letra P com as posições de cada lenho. A variável dependente Y assumiu os valores das propriedades de Densidade ou MOE. Os modelos foram executados com nível de significância de $\alpha = 0,05$.

$$Y = b_0 + b_1 (P_{1,2}) + b_2 (P_{1,2,3}) + b_3 (P_{1,2,3,4}) + b_4 (P_{1,2,3,4,5}) + b_5 (P_{2,3}) + b_6 (P_{2,3,4}) + b_7 (P_{2,3,4,5}) + b_8 (P_{3,4}) + b_9 (P_{3,4,5}) + b_{10} (P_{4,5}) \quad \text{Equação 7.}$$

$$Y = b_0 + b_1 (P_{1,1}) + b_2 (P_{2,2}) + b_3 (P_{3,3}) + b_4 (P_{4,4}) + b_5 (P_{5,5}) \quad \text{Equação 8.}$$

O modelo Eq. 7 foi modelado duas vezes. Isso foi feito para comparar qual dos modelos oferece as melhores correlações. Na primeira, os dados de posição foram considerados qualitativos, *i.e.*, se estavam presentes na tábua ou não. Quando presente a posição recebia o número 1, quando ausente recebia o número 0. Por exemplo, uma tábua com posições P₂, P₃ e P₄ presentes e ausência de P₁ e P₅ foram representadas como 0, 1, 1, 1, 0 (P₁, P₂, P₃, P₄ e P₅, respectivamente). Assim, essa tábua foi considerada uma tábua P₂₃₄.

Na segunda, os dados foram considerados quantitativos, de modo que as posições foram representadas pela sua respectiva quantidade de lenho (em percentual) presente em cada tábua. Considerando o exemplo acima, uma tábua com as posições P₂, P₃ e P₄ presentes, cujas quantidades sejam 20%,

50% e 40%, respectivamente, será considerada: $P_{,23} = 70\%$; $P_{,234} = 100\%$; $P_{,34} = 90\%$.

No modelo Eq. 8 as variáveis independentes foram consideradas variáveis quantitativas.

Todos os modelos, Eq. 7 e Eq. 8, foram executados uma vez considerando o intercepto b_0 e uma sem o intercepto.

A quantidade de lenho foi mensurada pelo método de análise de imagem da área transversal das tábuas (item 3.5.1). Os passos descritos acima foram executados para a propriedade do MOE, obtido pelo teste de flexão não destrutivo e para a densidade aparente das tábuas.

3.9 INFLUÊNCIA DO DESDOBRO NA CLASSIFICAÇÃO DAS TÁBUAS

Nesta etapa do estudo, apenas o sortimento A foi considerado. Como o sortimento A foi composto por dois desdobros distintos, as comparações foram realizadas entre os grupos A-1 e A-2. A comparação entre os dois grupos sucedeu-se de duas formas: (a) pela comparação do MOE do grupo e (b) pela estatística entre as classes de resistência estipuladas por normativas entre os grupos.

As normas utilizadas para a comparação foram a norma europeia EN 338 (EN, 2016a) e a norma brasileira NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b). Para o item (a), as classes de resistências foram atribuídas para cada grupo com base no MOE médio. A estatística entre a média de A-1 e A-2 foi realizada pelo teste t (Student) com nível de significância de 5%, com o auxílio do software estatístico Action Stat.

Para o item (b), as tábuas foram categorizadas dentro de cada uma das classes de resistência pelo MOE individual. As tábuas identificadas como desdobro A-1 foram categorizadas dentro de uma das classes de resistência descritas pelas normas. O mesmo procedimento foi realizado com o desdobro A-2. Em seguida, para cada norma e para cada classe, o percentual de tábuas classificadas foi calculado. Para comparar a qualidade do material entre os grupos A-1 e A-2 nas classes de resistência, as quantidades das tábuas em cada classe foram testadas pelo teste z, no software estatístico Action Stat.

Considerando um nível de significância de 5%, para duas amostras independentes.

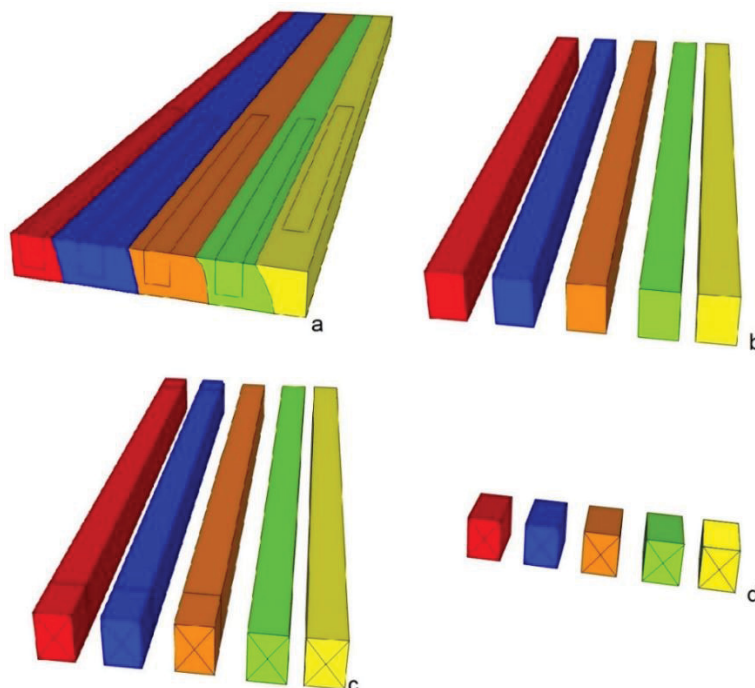
3.10 QUALIDADE DOS LENHOS NO ENSAIO DESTRUTIVO

3.10.1 Ensaio destrutivo a flexão

O ensaio de flexão não destrutivo foi executado para obter o MOE e MOR a flexão em diferentes idades da madeira de *Pinus taeda*. Essa etapa foi executada para comparar os resultados com os obtidos com o método limiar.

Na Figura 9 são ilustradas as etapas para a confecção dos corpos de prova sem defeitos extraídos das tábuas para cada posição radial. Para evitar que houvesse diferentes posições (cores) dentro do mesmo corpo de prova, os anéis de crescimento foram marcados com suas respectivas cores, ao longo de todo o sentido longitudinal das tábuas. Após esse processo os corpos de prova foram cortados.

Figura 9 - Diagrama do corte das tábuas (a – c) demarcadas em cinco posições para a obtenção dos corpos de prova de flexão destrutiva (b) e densidade (d).



Fonte: A Autora (2023).

Os procedimentos para a confecção dos corpos de prova seguiram as especificações da Norma Europeia EN 384 (EN, 2004). Na amostragem aleatória dos corpos de prova buscou-se representar a população inteira. Os valores foram corrigidos para o teor de umidade de 12% e por fim os valores característicos foram calculados.

As secções transversais dos corpos de prova foram de 30 mm de largura x 25 mm de espessura e o comprimento de 605 mm. Na Tabela 7 estão apresentados os números de corpos de prova para os testes destrutivos de flexão estática para cada posição.

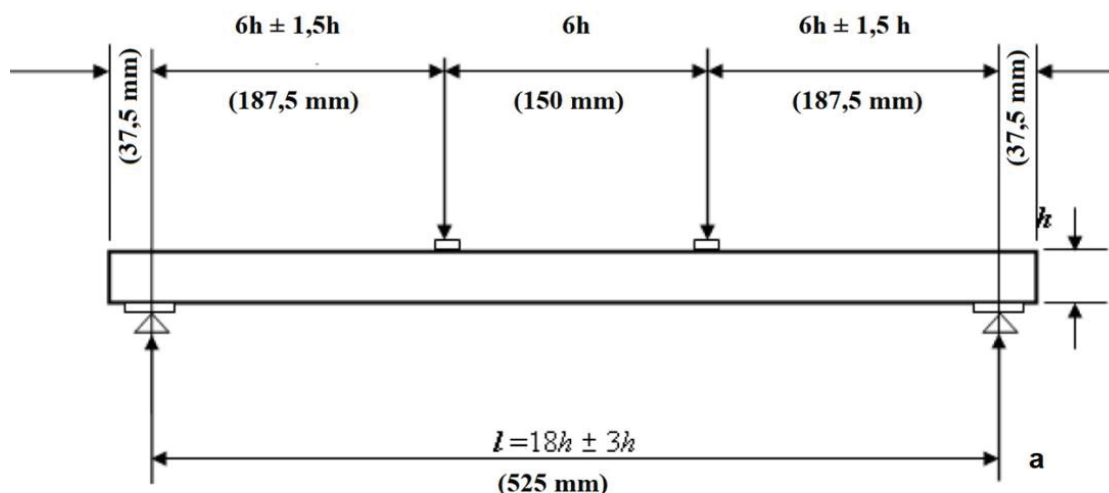
Tabela 7. Número de amostras em cada posição para a o teste destrutivo de flexão estática.

Posição/lenho	Nº de corpos de prova (n)
	Flexão estática
P₁	14
P₂	23
P₃	27
P₄	27
P₅	13

Fonte: A Autora (2023).

O teste destrutivo a flexão estática a quatro pontos foi executado em uma máquina de ensaio universal EMIC (DL 300 kN), conforme as recomendações da Norma Europeia EN 408 (EN, 2012) (Figura 10). O vão entre apoios foi de 525 mm, e a distância de aplicação da carga entre apoios foi de 150 mm (estes valores são determinados pela Norma, ou seja, o comprimento deve ser $18h + 3h$, sendo h a espessura do corpo de prova).

Figura 10 - Configuração de teste de flexão estática com as distâncias entre os pontos de apoio e aplicação de carga relativos à espessura (h), conforme a norma EN 408 (EN, 2012).



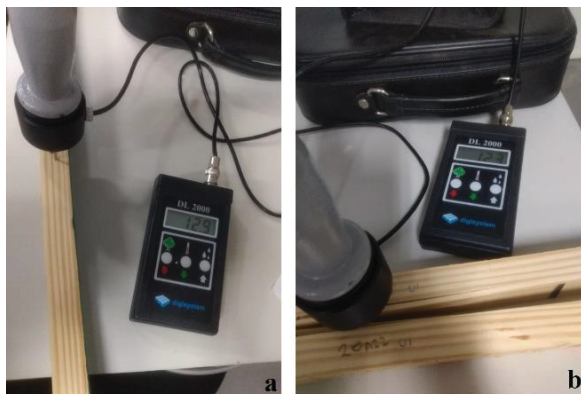
Fonte: A autora (2023).

A norma define que o carregamento deve ser configurado de modo que, a ruptura do corpo de prova, fique no tempo total de ensaio entre 180 e 420s (três a sete min). Para tal, dez corpos de prova com diferentes tipos de lenho foram escolhidos aleatória e previamente ensaiados. Ao fim, obteve-se uma velocidade de 4,5 mm/min de aplicação de carga.

Imediatamente após o término do teste, conforme preconiza a Norma Europeia EN 384 (EN, 2004), o teor de umidade foi medido nos corpos de prova. As agulhas foram inseridas o mais próximo possível dos locais das

rupturas (Figura 11). Para a medição utilizou-se um higrômetro de agulhas da marca Digisystem, modelo DL 2000.

Figura 11 - Medição do teor de umidade com higrômetro (a), com agulha inserida próxima à ruptura do corpo de prova (b).



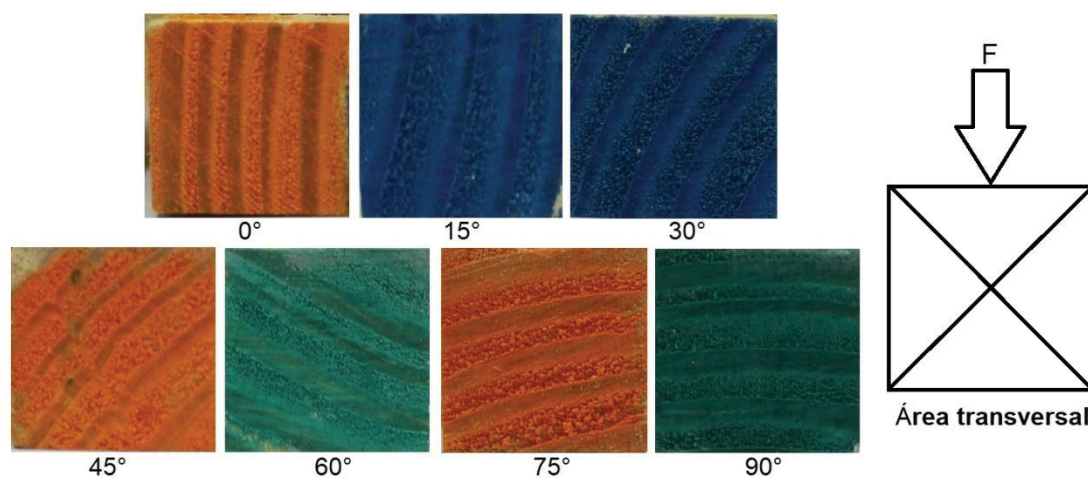
Fonte: A autora (2023).

Posteriormente, os valores de MOE e MOR foram calculados, e em seguida, corrigidos para a umidade base de 12%. Sendo que a norma EN 384 (EN, 2004) prevê que o MOE deve ser corrigido em 2% para cada $\pm 1\%$ de teor de umidade. Já o MOR deve ser corrigida em 3% para cada $\pm 1\%$ de teor de umidade. Em posse desses valores, com o software estatístico Action Stat, procedeu-se com a estatística de teste de Grubbs para identificar *outliers*, teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), teste de médias (Tukey), todos com nível de significância de 5%.

3.10.2 Determinação da inclinação da grã na área transversal

A inclinação da grã em relação à aplicação da carga, no teste de flexão destrutivo a quatro pontos, foi medida na área transversal de cada um dos 104 corpos de prova. Os ângulos observados foram de 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90° em relação à aplicação da carga (Figura 12).

Figura 12 – Ângulos da grã na área transversal dos corpos de prova em relação ao sentido de aplicação de força no teste de flexão estática.



F – Força aplicada no corpo de prova.

Fonte: A Autora (2023).

Com os valores dos ângulos, MOE e posição na área transversal do tronco, verificou-se se havia a dependência entre os fatores com um teste fatorial (nível de significância de 5%) executado com o software estatístico Action Stat.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA QUALIDADE DA MADEIRA

4.1 ANÁLISE POR IMAGEM DIGITAL DA ÁREA TRANSVERSAL DA TORA

Os resultados observados na análise digital de imagem das toras estão resumidos na Tabela 8. Para os três sortimentos estudados foram determinados os valores médios para o raio partindo da medula, a espessura e a área percentual nos lenhos. No sortimento A de trinta toras avaliadas, cinco foram descartadas da análise devido a dificuldades na medição por excesso de resina na ponta, presença de lenho de compressão e dificuldade de visualização dos anéis de crescimento nas zonas de lenho adulto. No sortimento B das cinco toras avaliadas, três foram descartadas na análise da área percentual devido à impossibilidade de identificar com precisão os anéis de crescimento pela quantidade de resina presente no topo das toras.

Tabela 8 – Valores médios e teste de médias Tukey para o raio, a espessura e a área percentual em cinco posições radiais em três sortimentos obtidos pela análise digital de imagem.

Posição (anéis cambiais)	Médias (S ¹)			
	Sortimento	Raio ²	Esp. ³	Área%
P₁ (0 – 6)	A (n = 25)	82,5 (11,0) a	82,5 (11,0) a	14,0 (3,0) b
	B (n = 5)	82,4 (10,3) a	82,4 (10,3) a	39,5 (1,0) a
	C (n = 5)	62,5 (10,5) b	62,5 (10,5) b	31,5 (9,8) a
P₂ (6 - 12)	A (n = 25)	133,6 (15,4) a	51,1 (7,3) a	22,0 (3,0) b
	B (n = 5)	129,3 (14,4) a	46,9 (7,4) ab	23,5 (4,6) ab
	C (n = 5)	102,1 (13,6) b	39,7 (6,6) b	28,0 (3,2) a
P₃ (12 – 18)	A (n = 25)	167,4 (16,1) a	33,8 (4,4) a	20,0 (2,0) b
	B (n = 5)	163,2 (17,6) a	33,9 (5,5) a	15,2 (0,2) c
	C (n = 5)	132,0 (15,4) b	29,9 (6,8) a	23,2 (2,7) a
P₄ (18 – 24)	A (n = 25)	193,9 (17,9) a	26,5 (4,8) a	18,0 (2,0) a
	B (n = 5)	190,7 (19,4) a	27,5 (2,6) a	14,0 (0,8) b
	C (n = 5)	151,1(17,0) b	19,0 (3,7) b	16,5 (4,3) ab
P₅ (24 – 30)	A (n = 25)	221,3 (15,2) a	27,4 (15,6) a	26,0 (5,0) a
	B (n = 5)	211,2 (15,8) a	20,6 (7,7) a	7,7 (3,1) b
	C (n = 5)	154,1 (16,6) b	3,0 (1,4) b	0,9 (2,0) b

¹ S – desvio padrão; ² Raio – raio partindo da medula em milímetros (mm); ³ Esp. – espessura em milímetros (mm); n – número de toras analisadas. Letras iguais diferem na coluna dentro de cada posição pelo nível de significância (α 0,05).

Fonte: A autora (2023).

Para averiguar se existiu diferença entre os sortimentos, um teste de médias (Tukey) foi executado. Para o comprimento do raio, apenas o sortimento C foi apresentou valor médio estatisticamente diferente das demais médias. Essa diferença ocorreu devido às toras desse sortimento serem provenientes de terceira e quarta tora, levando a um crescimento diferenciado das primeiras e segundas toras.

O comprimento do raio em todos os lenhos no sortimento C foram menores, isso pode ser explicado devido ao crescimento longitudinal da árvore. Conforme os anos passam a árvore cresce tanto no sentido radial quanto no longitudinal, levando a deposição contínua de anéis de crescimento. Essa deposição de anéis pode levar a um formato relativamente cilíndrico, conforme a espécie. No entanto, com o maior distanciamento da base, menor número de anéis e quantidade de lenho são observados (LARSON *et al.*, 2001; BALLARIN; NOGUEIRA, 2005; ENCINAS; SILVA; PINTO, 2005).

Para os valores médios da espessura também foi observado a tendência do sortimento C se diferenciar em quase todos os lenhos, com exceção do lenho P₃. Embora, neste lenho, não tenha ocorrido diferenças estatísticas entre as médias (p-valor 0,2589), deve-se considerar que a amostragem das toras nos sortimentos B e C foi pequena e por isso, não se descarta a possibilidade de que em uma amostragem maior diferenças possam ocorrer também no lenho P₃.

Para a área percentual em relação à área transversal total, observa-se que o valor médio do sortimento A apresentou diferença estatística em relação as médias dos demais sortimentos nos lenhos P₁, P₃ e P₅, igualando-se aos valores do sortimento B no P₂ e no P₄ com o sortimento C. A menor área de lenho P₁ e P₂ pode ter ocorrido devido ao fato de que quanto maior é o tempo da rotação, menor é a proporção de lenho juvenil presente em relação à área total. Isto é evidenciado pela maior homogeneidade percentual dos lenhos no sortimento A, enquanto nos sortimentos B e C a área percentual tende a diminuir conforme aumenta a idade dos lenhos.

Nos lenhos P₂ o valor médio do sortimento A pode ter sido estatisticamente igual ao Sortimento B devido à baixa amostragem deste último (n=2) e pela relação existente entre área total com a área de cada lenho, que

tende a diminuir ao aumentar a área do total. O mesmo princípio pode ser válido para a igualdade estatística entre o Sortimento A e C no lenho P₄.

4.2 RENDIMENTO GERAL

O rendimento de cada desdobro no seu respectivo sortimento pode ser observado na Tabela 9. Para o rendimento consideraram-se tábuas com as dimensões praticadas na serraria (150 e 100 mm de largura), refilos não foram incluídos na avaliação por não serem utilizados para a confecção de painéis estruturais. Salienta-se também que no Sortimento A, das 15 toras em cada desdobro, uma foi desconsiderada na análise. Isso ocorreu devido à proximidade da tonalidade das tintas utilizadas na marcação individual das toras, dificultando a separação dessas duas toras em seus respectivos desdobros.

Tabela 9 - Rendimento e número de tábuas de 150 mm e 100 mm de largura obtidos em dois desdobros (1 e 2) em três sortimentos (A, B e C) em toras de *Pinus taeda*.

Sortimento	A	A	B	C
Diâmetro da tora (mm)	430 – 550	430 – 550	350-450	250-350
(Tipo de desdobro)	(1)	(2)	(2)	(2)
Rendimento médio (%)	56,1	59,0	57,1	47,7
C.V(%)	(12,05)	(9,37)	(6,53)	(8,42)
Nº. de tábuas de 150 mm (%)	74,3	79,2	68,3	91,3
C.V(%)	(11,0)	(14,4)	(7,5)	(9,2)
Nº. de tábuas de 100 mm (%)	25,7	18,5	27,8	14,4
C.V(%)	(31,6)	(6,5)	(25,5)	(26,6)
n	14	14	5	5

Desdobro 1 – tangencial aos anéis de crescimento; Desdobro 2 – retirada do bloco central; C.V(%) – coeficiente de variação em porcentagem; n – número de toras desdobradas.

Fonte: A autora (2023).

As toras do sortimento A apresentaram no mínimo 9% maiores rendimentos do que as toras com menores diâmetros (C). Esse resultado já foi evidenciado por Murara Junior, Rocha e Truguilho (2013) que ao avaliarem o desdobro programado para toras de *Pinus* spp., obtiveram um rendimento

aproximadamente 10% maior entre as toras de maior diâmetro (381 – 440 mm) em relação às toras menores (281 – 340 mm).

As mesmas tendências foram identificadas no estudo conduzido por Dobner Junior, Higa e Rocha (2012), que avaliaram toras de *Pinus taeda* de grandes dimensões. O rendimento médio obtido pelos autores foi de 57%. Já a diferença no rendimento entre as toras de 300 – 349 mm de diâmetro (47,8%) e as de 450 – 499 mm (73,3%) foi de 25,5%. Quando comparados os resultados dos autores com os deste estudo, podemos notar que o rendimento para as toras de maior diâmetro (A), tanto no desdobro 1 quanto no 2, foram menores que os rendimentos obtidos pelos autores citados. No entanto, Dobner Junior, Higa e Rocha (2012), consideraram sete tipos de produtos diferentes, cujas larguras eram diversas umas das outras, podendo esse fator ser responsável pelo maior rendimento. Enquanto para este estudo foram utilizadas apenas tábuas com larguras de 150 e 100 mm.

Embora seja relatado que o desdobro de toras de pequenos diâmetros, oriundos de povoamentos jovens, tenha sido uma prática comum nas serrarias (CARDOSO JUNIOR, 2008; VITAL, 2008), os estudos com toras de grandes sortimentos são importantes e raros (DOBNER JUNIOR; HIGA; ROCHA, 2012), como o Sortimento A. Uma vez que toras de pequeno diâmetro apresentam grande proporção de lenho juvenil, resultando em tábuas com menores propriedades mecânicas, o que as torna não desejáveis para o uso estrutural.

Os desdobros A-1 e A-2, por serem do mesmo sortimento de toras, foram comparados entre si pelo teste T (Student). As médias e coeficientes de variação para o rendimento e para o número de tábuas 150 mm foram similares e corroborado pelo teste T. O rendimento, o número de tábuas 150 mm e o número de tábuas 100 mm, apresentaram variâncias homogêneas pelo teste de Levene a um nível de 5% de significância, com p-valores de 0,7738, 0,9799 e 0,2658, respectivamente. O teste T foi executado para as variáveis de rendimento e para as quantidades percentuais do número de tábuas obtidas por cada tora. Pelo teste, o rendimento e o n°. tábuas 150 mm foram iguais entre os desdobros 1 e 2, com p-valor de 0,2233 e 0,2013, respectivamente.

Já no número de tábuas 100 mm, o teste T salientou uma diferença entre o desdobro A-1 e A-2 (p-valor 0,0154), tendo A-1, maior número de tábuas de 100 mm do que no A-2. Além das diferenças nas médias entre os

dois desdobros, há um maior coeficiente de variação no A-1. Isso é explicado pela configuração do desdobro empregado no A-1, que tangencia os anéis de crescimento mais velhos. Enquanto no desdobro A-2, grande parte do material é cortado com largura de 150 mm, diminuindo, assim, a quantidade de material a ser refilado e obtendo-se uma menor quantidade de tábuas com larguras de 100 mm. Os altos valores do coeficiente de variação indicam que nem todas as toras podem apresentar as mesmas quantidades de tábuas com larguras menores. Isto pode ocorrer devido à variação do diâmetro, conicidade e diferenças ocorridas nos cortes no processo de desdobro.

Durante o processo de desdobro foi possível observar que devido ao operador da Serra Fita Vertical estar mais acostumado a praticar o Desdobro 2, este levou menos tempo para ser executado. No Desdobro 1 (não praticado pela serraria comercialmente) levou mais tempo para o operador se acostumar e realizar o processo. Isso também ocorreu para o operador da Serra Fita Horizontal, que levou mais tempo para colocar as placas na máquina devido a maior dimensão dos blocos. Embora o tempo de processamento por homem/máquina não tenha sido o foco desse estudo, notou-se que o tamanho das placas pode diminuir a velocidade do processo.

Em seções posteriores, será abordada a influência dos desdobros na quantidade de tábuas classificadas para uso estrutural, na norma europeia e brasileira.

4.3 QUALIDADE DAS TÁBUAS

4.3.1 Análise da área transversal das tábuas por imagem

Pela análise digital de imagem da área transversal foi possível classificar os conjuntos de posições nas tábuas. Observou-se em cada um dos sortimentos os tipos de conjuntos de lenhos (duas ou mais posições em uma tábua) mais comuns. Com esses dados, pode-se avaliar as diferenças entre os sortimentos e desdobros.

Desta forma, no Sortimento A foi constatado tábuas com conjunto de lenhos de $P_{,12}$, $P_{,123}$, $P_{,1234}$, $P_{,12345}$, $P_{,23}$, $P_{,234}$, $P_{,2345}$, $P_{,34}$, $P_{,345}$, $P_{,45}$. Tábuas com uma única posição na área transversal também foram observadas, ou seja,

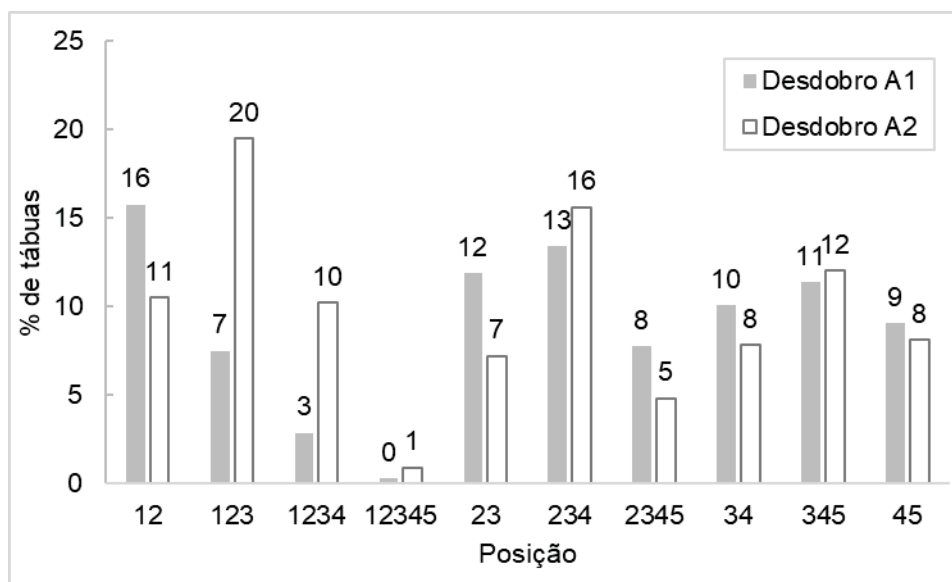
houve ocorrência de tábuas formadas apenas pela $P_{,1}$, cuja idade varia de zero a seis anos; tábuas formadas apenas de lenho $P_{,2}$ (seis a 12 anos); e sucessivamente para as outras três posições estudadas ($P_{,3}$, $P_{,4}$, $P_{,5}$).

No Sortimento B, houve tábuas com todos os conjuntos, com exceção do $P_{,12}$ e tábuas com apenas uma posição não foram observadas.

No Sortimento C, foram verificadas tábuas com conjuntos de lenhos de $P_{,12}$, $P_{,123}$, $P_{,23}$, $P_{,234}$, $P_{,34}$. Conjuntos com a presença da posição $P_{,5}$ não foram constatados. Esse resultado ocorreu em função das toras deste sortimento não apresentarem área suficiente desta posição. Assim, no processo de desdobro, nenhuma tábua foi cortada na área da $P_{,5}$. Tábuas com a presença de apenas uma posição também não foram observadas nesta análise.

Desta forma, salienta-se que quanto o maior o diâmetro da tora maior a chance de ser obter tábuas formadas por lenhos adultos ($P_{,4}$ e $P_{,5}$), o inverso ocorre quando se diminuiu o diâmetro. A Figura 13 ilustra o percentual de tábuas em cada conjunto de lenho por sortimento.

Figura 13 – Quantidade de tábuas com diferentes posições radiais na área transversal em três sortimentos (A, B e C).



Posição 12 – zero a 12 anéis cambiais; Posição 123 – zero a 18; Posição 1234 – zero a 24; Posição 12345 – zero a 30; Posição 23 – seis a 18; Posição 234 – seis a 24; Posição 2345 – seis a 30; Posição 34 – 12 a 24; Posição 345 – 12 a 30; Posição 45 – 24 a 30 anéis cambiais.

Fonte: A Autora (2023).

Na Figura 13 é possível observar que o Sortimento A apresenta uma distribuição mais homogênea dos percentuais de tábuas nos diferentes conjuntos. Apenas 1% das tábuas apresentaram todas as posições ($P_{1,2345}$) na área transversal. Tábuas com quatro ou mais posições na área transversal ($P_{1,234}$ e $P_{2,345}$) apresentaram menores percentuais do que as tábuas com três ou duas posições presentes (e.g. $P_{2,34}$, $P_{2,3}$). Isso pode ser um indicativo de que toras de sortimentos com maior diâmetro ao serem desdobradas em tábuas com larguras de 100 a 150 mm podem apresentar menor variação de lenhos. A variação dos lenhos pode acarretar a aumentar os defeitos, devido à secagem nas tábuas e/ou ao comportamento da madeira com as trocas de umidade com o ambiente (LARA PALMA; BALLARIN, 2003).

No sortimento B, tábuas com conjuntos formados por duas posições apresentaram menores quantidades do que tábuas com três ou quatro posições, sendo este um resultado oposto ao Sortimento A. Isto pode ser explicado devido ao menor diâmetro do Sortimento B. Assim, no momento do desdobro para obter tábuas com larguras de 150 mm, uma maior área será necessária, ou seja, uma tábua de 150 mm, proveniente para uma tora com 400 mm de diâmetro, apresentará maior variação dos lenhos presentes. Pois, devido à natureza circunferencial da tora, há menor chance de essa tábua ser cortada de zonas cuja curvatura dos anéis de crescimento contemple apenas uma área homogênea de idades, por exemplo, apenas lenhos de transição e adulto ($P_{3,4}$). Por consequência, pode ocorrer a tendência de haver tábuas com maior quantidade e variação dos lenhos.

No Sortimento C, devido ao menor diâmetro, grande parte das tábuas foi desdobrada das regiões internas das toras, portanto, a maioria das tábuas foi cortada com o limite de duas ou três posições. Isto pode estar relacionado ao menor diâmetro das toras que inviabiliza o corte de tábuas largas próximo às zonas mais próximas à casca. Como resultado, mesmo que haja a presença de lenho adulto, como a $P_{4,}$, no momento do desdobro, devido a maior curvatura dessas toras, essa área de lenho acaba sendo cortada fora restando poucas tábuas com a presença da $P_{4,}$.

Esses resultados são fatores importantes para analisar e programar a melhor metodologia de desdobro para um determinado sortimento, pois ao determinar a melhor metodologia busca-se obter o maior rendimento possível,

fator economicamente importante (MURARA JUNIOR; ROCHA; TIMOFEICZYK, 2010; DOBNER JUNIOR; HIGA; ROCHA, 2012; MURARA JUNIOR; ROCHA; TRUGUILHO, 2013).

Com a análise de imagem foi possível fazer observações sobre o lenho juvenil presente nas tábuas. Ao considerar a quantidade de tábuas com a presença da $P_{,1}$ nos conjuntos, ou seja, $P_{,12}$, $P_{,123}$, $P_{,1234}$, $P_{,12345}$, foi possível obter estimativas isoladas dos conjuntos de lenho juvenil ($P_{,12}$) e lenho juvenil com lenho de transição ($P_{,123}$).

Assim, no Sortimento A, cerca de 37% das tábuas continham a presença da $P_{,1}$. Desse percentual, 29% apresentaram apenas lenho juvenil ($P_{,12}$) ou lenho juvenil com lenho de transição ($P_{,123}$). No sortimento B, aproximadamente 53% das tábuas continham a presença da $P_{,1}$. Desse percentual, 29% apresentaram lenho juvenil com lenho de transição ($P_{,123}$). Já no sortimento C, cerca de 49% das tábuas apresentam lenhos $P_{,1}$ na sua composição, sendo os 49% compostos por lenho juvenil ($P_{,12}$) ou lenho juvenil com lenho de transição ($P_{,123}$).

Para o lenho adulto, ao considerar a quantidade de tábuas com a presença da $P_{,5}$ nos conjuntos, ou seja, $P_{,12345}$, $P_{,2345}$, $P_{,345}$, $P_{,45}$, foi possível obter estimativas isoladas para os conjuntos de lenho adulto ($P_{,45}$) e lenho adulto com lenho de transição ($P_{,345}$).

Como resultado, no Sortimento A, cerca de 29% das tábuas continham a presença da $P_{,5}$. Desse percentual, cerca de 21% apresentaram apenas lenho adulto ($P_{,45}$) ou lenho adulto com lenho de transição ($P_{,345}$). No Sortimento B, o total de tábuas com a presença da $P_{,5}$ também foi de 29%. Contudo, apenas 14% das tábuas apresentaram apenas lenho adulto ($P_{,45}$) ou lenho adulto com lenho de transição ($P_{,345}$). No Sortimento C, não houve tábuas com a presença da $P_{,5}$.

Esses percentuais são consolidados pelas afirmações da literatura, de que para obter tábuas com lenho adulto é necessário toras mais velhas. Logo, ao serrar essas toras, atinge-se um maior percentual de tábuas com a presença de lenho adulto e menor de lenho juvenil, pois, ao aumentar a tora em diâmetro, se reduz consideravelmente a proporção de lenho juvenil em relação à área total (BENDTSEN; SENFT, 1986; ZOBEL; SPRAGUE, 1998; MOORE; LYON; LEHNEKE, 2012; MOYA *et al.*, 2013).

4.3.2 Densidade aparente

As médias da densidade aparente para as tábuas nos sortimentos foram de aproximadamente $520 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para o sortimento A, $549 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para o sortimento B e $522 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para o sortimento C. Os valores para cada sortimento podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores médios, mínimos e máximos para densidade aparente a 12% de umidade em três sortimentos de *Pinus taeda*.

Propriedade	Sortimento		
ρ_{12} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	A	B	C
Mínimo	334	453	402
Máximo	818	677	634
Média	520	549	522
C.V (%)	10,8	8,6	10,1
s	55,9	47,2	52,9
n	804	113	46

Fonte: A Autora (2023).

A densidade básica para o *Pinus taeda* com 17 a 18 anos foi estimada por Trianoski *et al.* (2013), sendo que a média obtida pelos autores foi de $485 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Já Melo (2015) estudando a densidade nos sentidos longitudinal e radial, obteve uma média de $447 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para a espécie com 26 anos. Acquah *et al.* (2018) estudaram a densidade básica da espécie plantada na Georgia e Flórida, EUA com árvores entre 13 e 17 anos. Os autores tiveram valores variando de 370 a $790 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, com média de $520 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ballarin e Palma (2003) estudaram a densidade aparente da madeira de *Pinus taeda* com 37 anos e obtiveram valores variando de 420 a $787 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, com média de $605 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Ao comparar os resultados da Tabela 10 com a literatura, nota-se que a tendência da densidade em madeiras de *Pinus taeda* com idades maiores que 30 anos é semelhante. Enquanto em madeiras mais jovens a densidade é um pouco menor, mesmo considerando o fato de a densidade básica ser menor que a aparente, há coerência dos resultados com a literatura. Já que essa propriedade tende a aumentar com o crescimento radial, pode-se dizer que a

densidade desse estudo se apresenta similar a média observada por outros autores.

Os valores médios e característicos da densidade pela norma europeia e brasileira nos diferentes sortimentos podem ser observados na Tabela 11. Ao classificar os sortimentos pela densidade característica prevista na norma europeia, observou-se que em relação aos lotes pelo diâmetro da tora as classes variaram de C24 a C35. Ao utilizar a densidade média do lote, ainda pela norma europeia, todos os sortimentos foram classificados como C50. Pela norma brasileira, os sortimentos foram classificados na classe intermediária para uso estrutural.

Tabela 11 - Classificação do sortimento nas classes de resistência da EN 388 (EN, 2016) e NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b) pela densidade aparente.

		Sortimentos		
		A	B	C
EN 338	ρ_{05} (kg.m ⁻³)	427,7	471,2	434,5
	Classe	C24	C35	C27
	ρ_m (kg.m ⁻³)	520	549	522
	Classe	C50	C50	C50
NBR 7190 - 2	Classe ρ_m	Classe 2	Classe 2	Classe 2

Fonte: A autora (2023).

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados percentuais das tábuas classificadas dentro de cada classe de resistência pela EN 338 (EN, 2016). O sortimento B teve o maior número percentual de tábuas com classes superiores. Isto pode ser explicado pela maior densidade presente nesse sortimento em relação aos outros. Mas de forma geral, nota-se que em todos os sortimentos estudados, as tábuas apresentaram altas densidades, sendo inseridas nas classes de resistência superiores a C27, em especial a classe C50. Salienta-se o percentual baixo ou nulo nas classes estruturais entre C14 e C24 e que apenas uma tábua (0,1%) no sortimento A apresentou densidade menor do que o mínimo necessário para o uso estrutural.

Tabela 12 – Quantidade de tábuas classificadas nas classes de resistência da EN 338 (EN, 2016a) pela densidade aparente média.

Classe	Sortimento		
	A	B	C
	(%)		
<C14	0,1		
C14			
C16			
C18	0,2		
C20	0,5		2,2
C22	0,9		
C24	2,2		
C27	9,2	0,9	8,7
C30	5,3	0,9	6,5
C35	5,7	1,8	2,2
C40	7,1	3,5	6,5
C45	6,7	6,2	
C50	61,9	86,7	73,9

Fonte: A autora (2023).

O alto percentual de tábuas classificadas na C50 pode ser devido à densidade do *Pinus taeda* de rápido crescimento no Brasil. Visto que a norma europeia se baseia em dados científicos estimados com espécies que crescem na região (Europa), espécies com alta densidade e que cresceram em outras regiões podem não são devidamente classificadas pela densidade nessa norma.

Observou-se também que o sortimento C (menor diâmetro), teve maior percentual de tábuas do que no sortimento A (maior diâmetro). Isso pode ter ocorrido primeiramente pela pequena amostragem de C, influenciando para que uma tábua tenha maior impacto na porcentagem final, devido ao menor número de amostras. Em segundo, porque os dois sortimentos podem ter vindo de dois sítios de crescimento diferentes e como a colheita não foi acompanhada nesse estudo, características do sítio podem ter interferido para as diferenças de densidade observadas.

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados percentuais das tábuas classificadas dentro de cada classe de resistência pela norma brasileira NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b).

Tabela 13 – Quantidade de tábuas classificadas pela NBR 7190 – 2 (ABNT, 2022a) com base na densidade aparente em três sortimentos.

Sortimento	Classe	Classe	Classe	NS ¹
	1	2	3	
	(%)			
A	9,0	90,7	0,4	0,1
B	15	85	-	-
C	8,7	91,3	-	-

NS – Desclassificada para o uso estrutural; A – Sortimento com diâmetro de 430 a 550 mm; B diâmetro de 350 a 450 mm; C - diâmetro de 250 a 350 mm.

Fonte: A Autora (2023).

Diferentemente da norma europeia, a norma brasileira apresenta valores de densidade aparente maiores. Isto é refletido pelo fato de ambas as normas se basearem em estudos científicos com madeiras de suas regiões. As madeiras brasileiras de rápido crescimento, como o *Pinus taeda*, apresentam uma densidade média relativamente maior do que as madeiras coníferas europeias (ABNT, 1997; BALLARIN; PALMA, 2003; GRYC et al., 2011; TRIANOSKI et al., 2013; MELO, 2015; EN 338, 2016a; SOPUSHYNSKY et al., 2017). Isso se deve principalmente por serem espécies diferentes. Por isso, pode ser normal que os percentuais das tábuas classificadas pela NBR 7190 (ABNT, 2022) sejam diversos. Pode-se verificar que das três classes presentes na norma brasileira, grande parte das tábuas são classificadas dentro das duas primeiras.

4.3.3 Análise dos anéis de crescimento da área transversal das tábuas

Das 100 tábuas avaliadas, quatro foram desconsideradas por apresentarem parte ou a totalidade dos anéis de crescimento distorcidos devido à presença, ou à proximidade de nós, dificultando a visualização para a medição das larguras. Os anéis que estavam localizados nas extremidades da

tábua e não eram completamente visíveis, foram excluídos da análise. A largura média e número de anéis de crescimento médio a cada 25 mm para cada lenho estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores médios dos lenhos inicial e tardio nos anéis de crescimento em cinco posições radiais.

Posição	Somatório da Largura Média (mm)		Largura Média do anel (mm)		Número de anéis 25 mm (Proporção de lenho tardio)	Densidade pela ASTM D245 (ASTM, 2019)
	Inicial	Tardio	Inicial	Tardio		
P ₁	32,7	7,5	9,9	2,0	2	Não-Densa
P ₂	25,4	9,8	5,3	1,9	4 (>1/3)	Não-Densa
P ₃	15,9	9,1	3,4	1,9	5 (1/2)	Densa
P ₄	11,2	7,5	2,6	1,7	6 (1/2)	Densa
P ₅	8,2	7,1	2,0	1,8	6 (1/2)	Densa

Fonte: A autora (2023).

Nota-se que a largura média do lenho tardio não apresenta grande variação ao longo da direção radial. O lenho inicial apresenta considerável redução da largura ao se afastar da medula em direção a periferia do fuste. Este comportamento já foi observado nos estudos de Larson *et al.* (2001), Moore, Lyon e Lehneke (2012) e Pollet *et al.* (2017). As maiores larguras nas posições P₂ e P₃ podem ter sido ocasionadas por invernos mais amenos durante os anos de crescimento desses lenhos. Larson *et al.* (2001) afirma que as condições ambientais e práticas silviculturais podem impactar na formação dos lenhos, já que estes fatores influenciam os processos fisiológicos que regulam independentemente a espessura da parede e o diâmetro do lúmen dos traqueóides.

Avaliando as posições radiais pela norma americana ASTM D 245 (ASTM, 2019) observa-se que a P₁ é considerada madeira de baixa densidade, a P₂ apresenta uma variação de três a quatro anéis de crescimento a cada 25 mm e por isso pode ser considerada uma madeira de baixa densidade. A P₃ apresenta em média mais de quatro anéis de crescimento e o lenho tardio

corresponde a cerca de 1/3 da área total, podendo ser uma madeira de média densidade. Já as P₄ e P₅ apresentaram na média mais de seis anéis de crescimento e 1/2 da área da madeira foi composta por lenho tardio, sendo estas madeiras consideradas de alta densidade.

Na Tabela 15 estão apresentados as médias e coeficientes de variação para a porcentagem relativa de lenho inicial, tardio e a razão entre o lenho inicial e tardio. O teste de médias Tukey indicou diferenças entre as posições para a o lenho inicial, tardio e a razão i:t. Pode-se afirmar que o lenho inicial diminuiu com a maior idade da madeira e o inverso foi observado para o lenho tardio. Como consequência, a razão entre os lenhos i:t também diminuiu com a maior idade da madeira.

Tabela 15 – Valores médios da quantidade dos lenhos inicial e tardio no anel de crescimento em cinco posições radiais para a madeira de *Pinus taeda*.

		Posição				
		P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
% Relativa do Lenho Inicial		81,4 a	70,8 b	64,0 c	59,7 d	52,7 e
		6,5	9,9	13,1	12,0	14,3
% Relativa do Lenho Tardio	Média	18,6 e	29,2 d	36,0 c	40,3 b	47,3 a
	C.V (%)	28,4	24,1	23,3	17,7	15,9
i:t		4,8 a	2,6 b	2,0 c	1,6 d	1,2 e
		32,0	33,9	50,4	29,7	29,6
n		47	70	73	44	18

i:t – proporção entre lenho inicial e tardio; C.V (%) – coeficiente de variação em porcentagem; n - número de amostras.

Fonte: A Autora (2023).

O lenho tardio é considerado um dos principais fatores que influencia na densidade e consequentemente nas propriedades mecânicas. Nota-se um aumento de 10% quando as posições P₁ e P₂ são comparadas, cujos lenhos estão entre zero e 12 anos. Já entre os lenhos P₂, P₃, P₄ e P₅ os aumentos nas quantidades percentuais sobem mais sutilmente. Isto é reforçado pelos resultados da densidade determinada pelo número de anéis de crescimento da Tabela 14, sendo que as posições mais próximas à periferia apresentam maior quantidade de anéis por polegada e maior quantidade de lenho tardio.

A diminuição do coeficiente de variação ao longo das posições, aponta que a quantidade de lenho tardio se mantém com o passar dos anos, enquanto a largura dos anéis diminui até que inicie a estabilização da largura. Já para o lenho inicial observa-se um comportamento oposto e menor variação do c.v, isto pode representar que com o passar dos anos, embora a quantidade de lenho inicial diminua, há momentos em que a árvore aumenta a taxa de crescimento, ocasionando maiores variações. O baixo c.v nas posições iniciais P_{,1} e P_{,2}, indicam uma formação mais constante do lenho inicial nos primeiros anos de crescimento da árvore.

A estatística descritiva indica que a razão entre o lenho inicial e tardio (i:t) decresce com o passar dos anos. A quantidade de lenho inicial diminui quase 30% entre a P_{,1} e a P_{,5}. Como consequência da diminuição do lenho inicial, a quantidade do lenho tardio em relação à área total aumenta. Neste ponto, destaca-se que a quantidade de lenho tardio não aumenta com o passar dos anos, como observado na largura média da Tabela 14.

Quanto a variação nos lenhos, notou-se que houve uma grande variação na P_{,3}, para a razão i:t. Isto pode ser explicado por esse lenho estar presente em uma zona de transição e esta, ser caracterizada por maior variação na proporção de lenho inicial.

A razão i:t apresenta um decréscimo bruto entre os lenhos de zero a seis anos e seis a 12 anos, sendo que a taxa de lenho inicial diminui quase pela metade. A partir dos 12 anos o decréscimo continua ocorrendo, porém, entre os 12 e 18 anos cai para quase 30% e praticamente estabiliza após os 18 anos com decréscimos em torno de 20%, sendo que entre os lenhos zero – seis e 24 – 30 a razão cai quase 75%.

Embora esse padrão de decréscimo do lenho inicial ao aumentar o número de anéis cambiais na madeira seja comum, não é aconselhado utilizar apenas os anéis de crescimento para avaliar a qualidade da madeira (LARSON *et al.*, 2001). Assim, as informações sobre os anéis de crescimento estão normalmente atreladas a outros fatores na madeira. Isto foi evidenciado no estudo de Fiorelli, Dias e Coiado (2009), os quais encontraram correlações entre o número de anéis, a área transversal ocupada por nó e a resistência a tração para a madeira de *Pinus*.

4.3.4 Classificação visual das tábuas

Na Tabela 16 estão apresentados a quantidade de tábuas classificadas nas cinco classes estruturais e suas porcentagens em relação ao número total de tábuas para o Sortimento A.

Tabela 16 – Quantidade de tábuas classificadas nas classes visuais para o Sortimento A.

Sort. A	Classe Visual				
	SE	S1	S2	S3	NS
%	51,0	7,5	3,7	14,4	23,5
n	454	67	33	128	209

SE – classe especial, S1 – primeira classe; S2 – segunda classe; S3 – terceira classe; NS - desclassificada; n – número de amostras.

Fonte: A Autora (2023).

Considerando a classificação visual pelos nós, o Sortimento A teve aproximadamente 24% das tábuas desclassificadas pelo tamanho do diâmetro dos nós. Mais da metade das tábuas foram consideradas limpas ou classe SE.

Avaliando tábuas de madeira de *Pinus* spp., com 30 anos, Carreira e Dias (2005) obtiveram resultados similares. Os autores constataram que cerca de aproximadamente 54% das tábuas se enquadravam na classe SE. No entanto, somente 16% das tábuas foram consideradas NS, porcentagem menor do que as desse sortimento. Contudo, essa variação é esperada devido a diferenças de crescimento e manejo silvicultural realizado em cada povoamento florestal.

Na Tabela 17 pode-se observar a quantidade número de tábuas classificadas nas diferentes classes estruturais e suas porcentagens em relação ao número total de tábuas para o Sortimento B.

Considerando a classificação visual pelos nós, o Sortimento B teve aproximadamente 29% das tábuas desclassificadas pela qualidade referente aos nós. Diferentemente do Sortimento A, aproximadamente 32% das tábuas foram consideradas classe especial. Ao comparar com os resultados de Carreira e Dias (2005) o Sortimento B apresenta menores valores para as classes consideradas SE e maiores para a NS. No entanto, diferenças entre sítios e manejo devem ser consideradas.

Tabela 17 – Percentual de tábuas classificadas nas classes visuais para o Sortimento B.

Sort. B	Classe Visual				
	SE	S1	S2	S3	NS
%	31,9	13,3	6,2	19,5	29,2
n	36	15	7	22	33

SE – classe especial, S1 – primeira classe; S2 – segunda classe; S3 – terceira classe; NS - desclassificada; n- número de amostras.

Fonte: A Autora (2023).

A menor classificação de tábuas nas melhores classes em relação ao Sortimento A era esperada. Devido ao menor diâmetro do tronco, e ao maior número de nós estar concentrado no centro da tora, há uma probabilidade maior de que mais tábuas tenham a presença de nós, uma vez que o desdobro realizado no Sortimento B, prioriza o corte central da tora para obter o máximo rendimento.

A madeira de *Pinus taeda* apresentou nós consideravelmente grandes em diâmetro. Mesmo nos casos das tábuas com apenas um nó, seu tamanho desclassificou a tábua para as classes mais baixas da grade.

A quantidade de tábuas classificadas nas classes estruturais e suas porcentagens em relação a somatória do Sortimento C estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Percentual de tábuas classificadas nas classes visuais para o Sortimento C.

Sort. C	Classe visual				
	SE	S1	S2	S3	NS
%	26,0	17,4	17,4	15,2	23,9
n	12	8	8	7	11

SE – classe especial, S1 – primeira classe; S2 – segunda classe; S3 – terceira classe; NS - desclassificada; n- número de amostras.

Fonte: A Autora (2023).

Examinando a classificação visual pelos nós, o Sortimento C teve aproximadamente 24% das tábuas desclassificadas pela qualidade. Do total, apenas 26% das tábuas são classificadas como classe especial.

Assim como no Sortimento B, a menor classificação de tábuas nas melhores classes era esperada. O menor diâmetro do tronco resulta em maior

número de nós. Como o desdobro realizado no Sortimento C, prioriza o corte central da tora para obter o máximo rendimento, grande parte das tábuas apresentou pelo menos um nó presente. Isto pode ser evidenciado pela distribuição quase homogênea entre as classes.

Essas toras também tinham nós com maior diâmetro e quantidade. Como este sortimento é composto de terceiras e quartas toras, o maior número de nós pode estar relacionado ao método de desrama. A partir de certa altura, a desrama não é praticada, fazendo com que os galhos aumentem os diâmetros com o tempo. Desta forma, nós maiores podem ser observados nesse tipo de tora.

Ao comparar os percentuais de tábuas classificadas nas classes de qualidade, notou-se que o tamanho e a quantidade dos nós, tiveram influência direta na quantidade de material classificado. Das tábuas classificadas, 26% continham características não desejáveis para serem destinadas a produtos de maior qualidade. Embora não tenha sido avaliado a distância dos nós em relação à medula, pode-se dizer que estes estão presentes em maior quantidade na parte central do tronco. Isso foi evidenciado principalmente durante o desdobro do Sortimento A, em que se observou maior presença de nós na área central do que nas áreas externas nas toras. Dessa forma, a quantidade de área com nós superiores às normativas parece ser estável nos três sortimentos, enquanto a quantidade de tábuas limpas e de classe especial (SE) aumenta conforme se aumenta o diâmetro do sortimento.

4.3.5 Módulo de elasticidade

O MOE médio para a espécie de *Pinus taeda* foi de aproximadamente 10.180 MPa, com coeficiente de variação de 41,6%. A classificação dos grupos na norma europeia EN 338 (EN, 2016a) pelo MOE foi de C22 para o sortimento A (10.797 MPa) e NS (não estrutural) para os sortimentos B (6.344 MPa) e C (5.256 MPa). A distribuição das tábuas em cada sortimento e agrupadas dentro de cada classe de resistência pela EN 338 (EN, 2016a) pode ser observada na Tabela 19.

Tabela 19 - Classificação das tábuas nas classes de resistência da EN 338 (EN, 2016a) pelo módulo de elasticidade à flexão em três sortimentos de *Pinus taeda*.

Sortimento		NS	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
	n	144	88	93	54	47	83	42	38	86	75	42	38	64
A (A1 + A2)	%	16,0	9,8	10,4	6,0	5,3	9,3	4,7	4,3	9,6	8,4	4,7	4,3	7,2
(n = 894)	$\Sigma_{NS}(\%)$	16,0												
	$\Sigma_S(\%)$	84,0												
	n	65	20	10	3	4	6	2	1	1	1	-	-	-
B	%	57,5	17,7	8,8	2,7	3,5	5,3	1,8	0,9	0,9	0,9	-	-	-
(n = 113)	$\Sigma_{NS}(\%)$	57,5												
	$\Sigma_S(\%)$	42,5												
	n	34	6	2	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-
C	%	75,7	13,3	4,4	4,4	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-
(n = 45)	$\Sigma_{NS}(\%)$	75,7												
	$\Sigma_S(\%)$	24,3												

NS – Desclassificada; n – Número de amostras; Σ_{NS} – Somatório de tábuas desclassificadas; Σ_S – Somatório de tábuas classificadas como estruturais; A – sortimento com toras de diâmetro de 430 a 550 mm; B – diâmetro de 350 a 450 mm; C – diâmetro de 250 a 350 mm.

Fonte: A autora (2023).

O sortimento A teve uma boa representatividade percentual de tábuas classificadas dentro de todas as classes de resistência estipuladas pela norma. No sortimento B, a maioria das tábuas classificadas como estruturais foram categorizadas entre as classes C14 e C22, e apenas 4,5% se classificaram entre as classes C24 e C35. O sortimento B não apresentou nenhuma tábua classificada nas maiores classes estruturais e teve mais da metade das tábuas classificadas como NS. Já o sortimento C, não apresentou nenhuma das tábuas com classificação estrutural superior a C22 e mais de 75,6% do material foi classificado como NS.

Pela norma brasileira NBR 7190 2 (ABNT, 2022b), a classificação dos grupos pelo MOE foi de Classe 2 para o sortimento A e Classe 3 os sortimentos B e C.

No entanto, dentro de cada grupo há diferentes proporções de tábuas classificadas nas classes de resistência. Os valores médios resultantes para essas classes em três sortimentos podem ser observados na Tabela 20. Nos sortimentos de menor diâmetro, há um maior percentual de tábuas classificadas nas classes mais baixas. Ao aumentar o diâmetro do sortimento, a quantidade

de tábuas classificadas na Classe 1 aumenta consideravelmente. Este pode ser um indicativo da relação existente entre o aumento da área de madeira de lenho adulto (com o maior número de anéis cambiais), com o aumento da densidade do sentido radial.

Tabela 20 - Classificação das tábuas por sortimento nas classes de resistência pela NBR 7190 (ABNT, 2022) pela propriedade do módulo de elasticidade.

Sortimento		Classe			
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	NS
		(MPa)			
A	n	385	277	217	15
	%	43,1	31,0	24,3	1,6
B	n	5	23	67	18
	%	4,4	20,4	59,3	15,9
C	n	-	5	25	15
	%	-	10,9	54,3	32,6

NS – Desclassificada; n – Número de amostras; A – sortimento com diâmetro de 430 a 550 mm; B – diâmetro variando de 350 a 450 mm; C – diâmetro de 250 a 350 mm.

Fonte: A autora (2023).

Nota-se que no Sortimento A, aproximadamente 98% das tabuas foram classificadas como estruturais pelo MOE. No Sortimento B, esse valor caiu para aproximadamente 82% e no Sortimento C apenas 67% das tábuas foram classificadas como estruturais.

Ao classificar peças de *Pinus* de 30 anos pelo MOE e pelas classes visuais determinadas na ASTM D245 (ASTM, 2019), Carreira e Dias (2005) mostraram que cerca de 84% das tábuas foram classificadas como estruturais. Ao comparar os sortimentos, nota-se que no B os resultados são similares pela classificação da norma brasileira. O sortimento A foi similar pela norma europeia e superior pela norma brasileira, e o sortimento C, teve menor percentual de tábuas classificadas. Isto é um indicativo de que a madeira de *Pinus* com maior número de anéis cambiais (>30) apresenta bons percentuais de tábuas classificadas para uso estrutural.

Os resultados percentuais médios obtidos nos diferentes sortimentos, classes e normas são importantes informações para planejamento estratégico do setor de produtos estruturais à base de madeira. O rendimento de tábuas

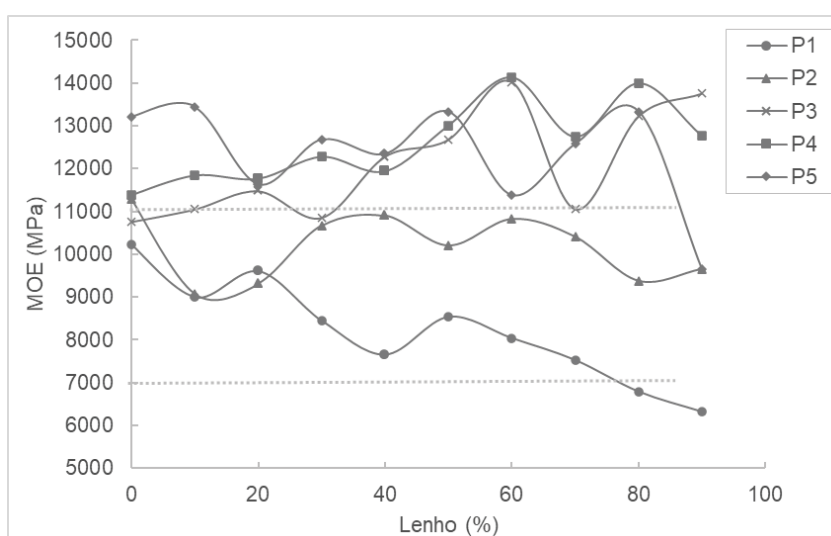
para determinados fins, podem impactar na logística de compra, na análise econômica, podendo auxiliar nas tomadas de decisões sobre qual material comprar com base no uso final do produto a ser produzido.

4.4 DETERMINAÇÃO DA ZONA JUVENIL PELO MÉTODO LIMIAR

Os gráficos do método limiar para os sortimentos avaliados neste estudo são apresentados a seguir. No Apêndice 2 estão os valores médios utilizados nos gráficos para cada sortimento. Para esta etapa, utilizou-se a quantidade percentual de lenho determinado na análise de imagem da área transversal das tábuas no item 3.5.1 e o MOE não destrutivo no item 3.5.5.

Para definir o ponto limite no sortimento A, uma reta foi traçada no MOE de 7.000 MPa (C14), valor escolhido por ser considerado o mínimo para uma tábua ser estrutural pela norma europeia EN 338 (EN, 2016). Adicionalmente, uma reta foi marcada no MOE 11.000 MPa (C24), esse valor foi escolhido por representar a qualidade da grande maioria das tábuas utilizadas para a produção de MLCC no mercado externo. Na Figura 14 observa-se a distribuição média do MOE nas variações da quantidade em percentual de área de lenho presentes em tábuas de *Pinus taeda*.

Figura 14 – Valores do MOE e quantidade percentual das posições radiais nas tábuas do sortimento A para os pontos limites de 7.000 e 11.000 MPa.



P1 – lenho de zero a seis anéis cambiais; P2 – lenho de seis a 12 anéis; P3 – lenho de 12 a 18 anéis; P4 – lenho de 18 a 24 anéis; P5 – lenho de 24 a 30 anéis.

Fonte: A autora (2023).

Na Figura 14 notou-se que em média, as tábuas com a presença de mais de 75% do lenho juvenil $P_{,1}$ (zero a seis anos) não apresentaram valores de MOE suficiente para serem utilizadas como madeira estrutural. Nas tábuas com lenhos $P_{,1}$, cuja porcentagem foi menor que 75%, apresentaram MOE para serem classificadas como estruturais nas classes mais baixas (C14 e C16). Isso foi possível devido à presença de lenhos mais velhos que provavelmente compensaram o MOE, aumentando a grade de classificação da tábua. As tábuas de lenho $P_{,2}$ (seis a 12 anos), não apresentaram um MOE mínimo para serem classificadas acima de C24. Isso ocorreu em todas as quantidades de área presente do lenho, mas em média, elas se enquadraram nas classes mais baixas.

Resultados semelhantes foram obtidas por Moore, Lyon e Lehneke (2012), em um material similar às tábuas com madeiras de $P_{,1}$ e $P_{,2}$ avaliadas neste estudo. Ao estudar a madeira proveniente de toras de *Pinus sylvestris*, eles constataram que para as madeiras provenientes do núcleo da tora até os 15 anéis cambiais, a classe estrutural foi de C14. Essa classe foi para tábuas classificadas em uma máquina de classificação não destrutiva da madeira.

Em relação ao lenho $P_{,3}$ (12 – 18 anos) observou-se que os valores ficaram ao redor da média de 11.000 MPa. Como ele foi considerado um lenho de transição, pode-se observar uma maior oscilação da linha, isso pode ocorrer devido a maior ou menor influência dos lenhos juvenil e adulto. Assim, as tábuas de lenho $P_{,3}$ apresentaram maior MOE quando aliadas as posições $P_{,4}$ e $P_{,5}$ e menor MOE quando estava conjuntamente com as $P_{,1}$ e $P_{,2}$.

Os menores valores do MOE observados na $P_{,3}$, quando sua área na tábua foi menor, podem ser explicados pelo fato de ser um lenho intermediário. Porque parte das tábuas teve presença do lenho adulto e parte teve presença de lenho juvenil, sendo que esses últimos podem ter ocasionado menores valores da propriedade para o lenho $P_{,3}$.

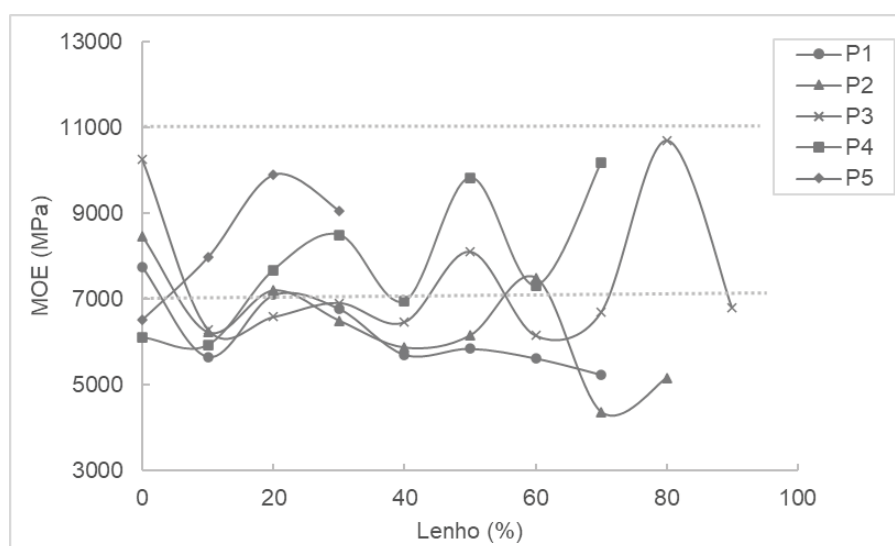
Em relação às tábuas com MOE superior a 11.000 MPa, apenas os lenhos $P_{,4}$ e $P_{,5}$ (mais de 18 anéis de crescimento) apresentaram área suficiente de lenho em quaisquer porcentagens para que as tábuas sejam classificadas nas classes C24 ou superiores.

Ainda pode-se constatar que quanto maior a área de lenho $P_{,1}$ presente na tábua, menor será o MOE. Enquanto para os lenhos $P_{,3}$ ou superiores, ao aumentar a quantidade de presença desses lenhos nas tábuas, observa-se um aumento da propriedade.

Devido à maior quantidade de anéis de crescimento das toras do Sortimento A, os resultados foram comparados com o estudo conduzido por Ballarin e Palma (2003), cujo material avaliado possuía 37 anos. Os autores concluíram que com a idade cambial acima de 18 anos, a madeira de *Pinus* já apresenta MOE mínimo de 11.600 MPa. No lenho juvenil, cuja idade cambial os autores consideraram até 12 anos, o MOE médio foi de 10.800 MPa. Com os dados apresentados por Ballarin e Palma (2003), observa-se uma similaridade com os resultados para o *Pinus* do sortimento A, já que neste estudo o lenho juvenil foi considerado lenho até 12 anos.

Para o sortimento B, pode-se observar a distribuição média do MOE em relação às áreas dos lenhos, variando de 0% a 100%, em tábuas de *Pinus taeda* na Figura 15. Os pontos limites para o método limiar foram os mesmos utilizados anteriormente, MOE de 7.000 MPa e 11.000 MPa, ambos valores considerados estruturais pela norma europeia EN 338 (EN, 2016a).

Figura 15 - Valores do MOE e quantidade percentual das posições radiais nas tábuas do sortimento B para os pontos limites de 7.000 e 11.000 MPa.



P1 – lenho de zero a seis anéis cambiais; P2 – lenho de seis a 12 anéis; P3 – lenho de 12 a 18 anéis; P4 – lenho de 18 a 24 anéis; P5 – lenho de 24 a 30 anéis.

Fonte: A autora (2023).

Diferentemente do Sortimento A, no sortimento B cujas toras possuíam diâmetro médio de 350 a 450 mm, não houve quantidade de madeira suficiente para compensar os baixos valores de MOE e assim, classificar as tábuas na classe C24 ou superior.

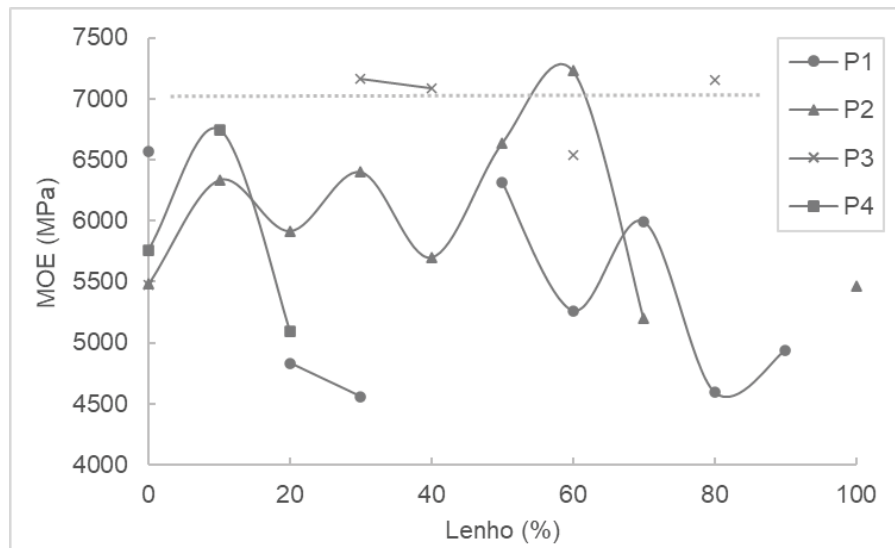
Ressalta-se que algumas quantidades de área da presença dos lenhos não foram observados no sortimento B, e por isso, não puderam ser contabilizados nesta análise. Como exemplo, observa-se o lenho P₅, que não teve tábuas amostradas com quantidade superior a 40%. Essa tendência é esperada em sortimentos de menor diâmetro, pois no momento do desdobro, não é possível obter tábuas de maiores larguras com a presença exclusiva de lenhos adultos, já que este lenho está em formação na árvore.

Neste sortimento, quase todas as tábuas com a presença de lenho P₁ não possuem os valores mínimos do MOE para serem classificados como tábuas estruturais. A tendência foi similar para tábuas com a P₂. Isso pode ocorrer pela menor quantidade de madeira adulta presente nesses sortimentos, diminuindo a quantidade de madeira com maior MOE e assim, tendo menor compensação da propriedade.

As tábuas com a presença de lenhos P₃ e P₄ apresentaram valores mínimos para serem consideradas para o uso estrutural. No entanto, reconhece-se que quando a área desses lenhos é pequena, o MOE é menor e pode não apresentar os valores mínimos para a madeira ser estrutural. Isso pode ser devido a maior influência do lenho juvenil, pois neste sortimento, a presença de P₅ foi pouca ou nula. Assim, uma tábua na qual a área de P₃ e P₄ seja pequena, terá por consequência maior área de lenho P₁ e P₂, contribuindo para o menor MOE. Mesmo que esse sortimento tenha material classificado nas classes mais baixas para uso estrutural, uma análise econômica deve ser realizada para verificar o custo/benefício.

Para o sortimento C pode-se observar a distribuição média do MOE em relação às quantidades dos lenhos, variando de 0% a 100%, em tábuas de *Pinus taeda* na Figura 16. Os pontos limites para o método limiar foram os mesmos utilizados anteriormente.

Figura 16 - Valores do MOE e quantidade da área em percentual das posições radiais nas tábuas do sortimento C para os pontos limites de 7.000 MPa.



P1 – lenho de zero a seis anéis cambiais; P2 – lenho de seis a 12 anéis; P3 – lenho de 12 a 18 anéis; P4 – lenho de 18 a 24 anéis.

Fonte: A Autora (2022):

Como já observado no Sortimento B, devido ao menor diâmetro das toras do Sortimento C, grande parte das tábuas não teve presença de posições P₄ e P₅ suficientes para serem contabilizadas nessa análise. A posição P₅ não foi observada nas tábuas estudadas e a P₄ teve algumas tábuas contento até 20% de presença.

Como grande parte das tábuas eram formadas por lenhos de P₁ a P₃, a maioria dos resultados apresentou valores de MOE variando de 5.500 a 6.500 MPa. Isso pode ser um indicativo de que quando há baixa ou nenhuma presença de lenho adulto, não ocorre uma compensação do MOE e, consequentemente, a classificação das tábuas é baixa.

Ainda se constatou pela Figura 16 que a maioria das tábuas provenientes do Sortimento C, não apresentaram a classificação mínima para serem consideradas estruturais pela EN 338 (EN, 2016a). Isto pode ser evidenciado pela Tabela 19, em que mais de 75% das tábuas do Sortimento C apresentaram MOE menores que 7.000 MPa.

Essa baixa classificação das tábuas, pode ser devido a fatores como o menor diâmetro das toras (250 a 350 mm), resultante de menores proporções de lenho adulto presente, portanto, apresentam menores propriedades mecânicas (ZOBEL; SPRAGUE, 1998; LARSON *et al.*, 2001; MOORE; LYON;

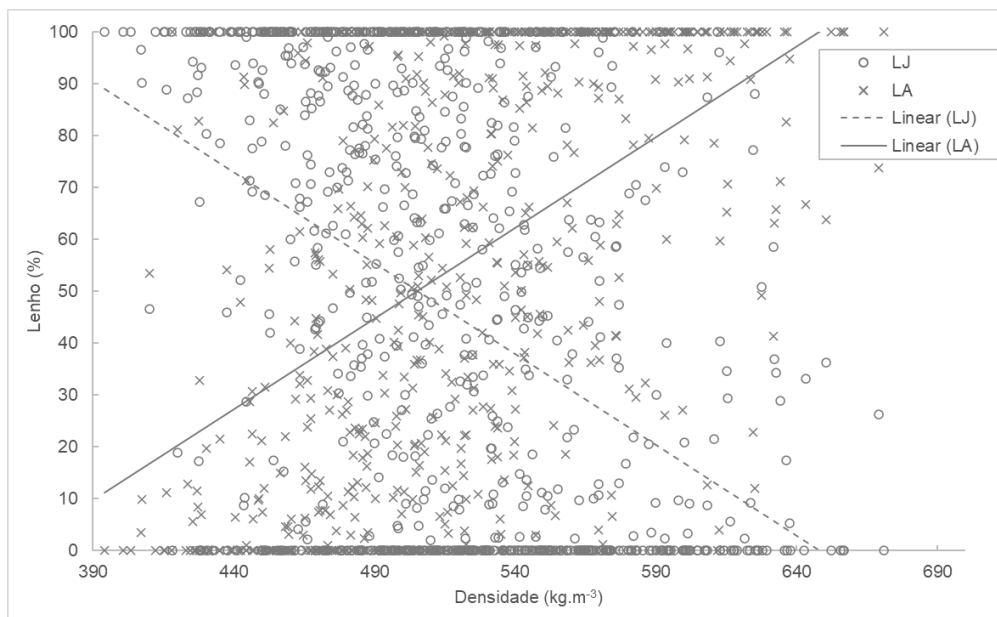
LEHNEKE, 2012). As toras do sortimento C foram representadas por terceiras e quartas toras no tronco da árvore, ou seja, estão em maiores alturas em relação à base do tronco da árvore. Como consequência, devido ao crescimento em cilindro, mesmo que a árvore apresente maior número de anéis de crescimento na base, terá menor quantidade nas toras de topo e por isso, menor área de lenho adulto. Visto que a formação do núcleo do lenho juvenil ao longo do tronco é desenvolvida consistentemente, as toras de base apresentarão maior proporção de lenho adulto do que toras mais altas dentro da mesma árvore (LARSON *et al.* 2001; BALLARIN; NOGUEIRA, 2005).

Adicionalmente, o MOE pode ter sido influenciado pela presença de nós, verificados neste sortimento em quantidade. Como as toras do sortimento C foram terceiras e quartas toras, há a possibilidade de que a desrama não tenha sido executada a partir de determinada idade/altura da árvore, resultando em toras com maior número de nós. Assim, as toras provenientes destes sortimentos não apresentaram quantidade de material suficiente para serem utilizadas como matéria-prima para produtos estruturais de madeira.

4.5 DETERMINAÇÃO DA ZONA JUVENIL POR CORRELAÇÕES

Com os dados da densidade, MOE e a área em percentual dos lenhos nas tábuas, as correlações foram realizadas entre as variáveis. Na Figura 17 estão apresentados os dados para o Sortimento A, com suas linhas de tendência entre os percentuais de cada posição com o ponto que indica a correspondente densidade.

Figura 17 – Valores da densidade aparente (12%) para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de *Pinus taeda* provenientes do Sortimento A.



Fonte: A autora (2023).

Na Figura 17 é possível observar a variabilidade das áreas percentuais de cada lenho (juvenil ou adulto) e sua influência na densidade aparente. A linha de tendência evidencia um decréscimo da propriedade em maiores quantidades de lenho juvenil. O comportamento é inverso quando há maior área de lenho adulto. Em média, tábuas com 50% de lenho juvenil apresentam densidade de aproximadamente 510 kg.m⁻³, sendo consideradas Classe 2 pela norma brasileira NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b). Para que a tábua seja Classe 1, a quantidade de lenho juvenil presente na madeira deve ser menor que 15%. Como o *Pinus* brasileiro apresenta maiores densidades do que as coníferas europeias, qualquer proporção de lenho juvenil em uma tábua, classificaria a madeira como estrutural pela densidade pela norma europeia.

As equações 9 e 10 foram resultantes da correlação para os lenhos juvenil e adulto. Hipoteticamente, ao necessitar-se que uma tábua tenha no mínimo 400 kg.m⁻³ de densidade (mínimo para a classe 2 da norma brasileira), o resultado indica que pelo menos 13% precisaria ser lenho adulto.

$$LA = 0,35x - 126,85$$

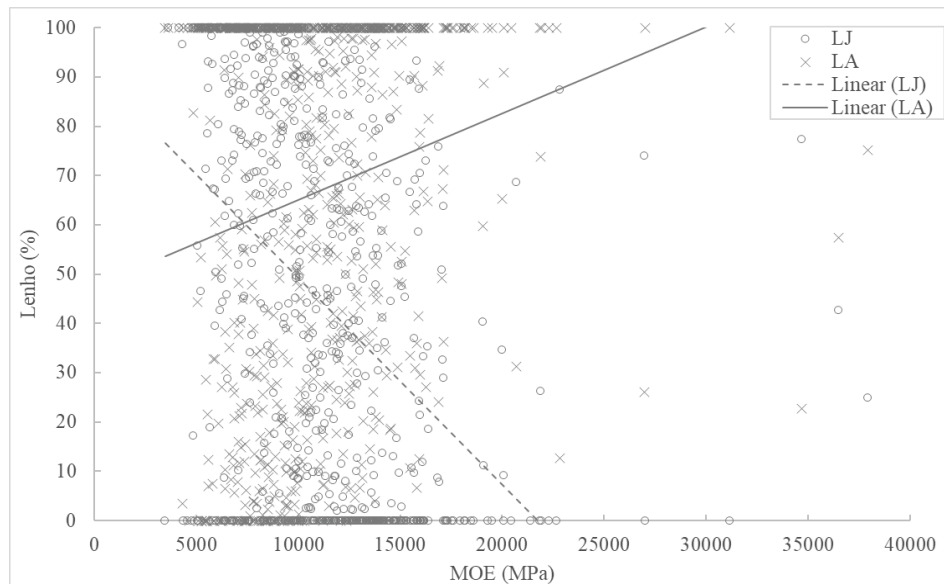
Equação 9.

$$LJ = -0,35x + 226,93$$

Equação 10.

Na Figura 18, está ilustrado as linhas de tendência entre a quantidade de cada posição em percentual com o ponto que indica o correspondente MOE.

Figura 18 - Valores do MOE para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de *Pinus taeda* provenientes do Sortimento A.



Fonte: A autora (2023).

Na Figura 18 é possível observar uma grande variabilidade da quantidade de área do lenho juvenil e adulto e sua influência no valor MOE. A linha de tendência evidencia um decréscimo no MOE em maiores porções do lenho juvenil. O comportamento foi inverso quando houve maior quantidade de lenho adulto. Os resultados da correlação corroboraram o fato, sendo que, entre os dados de lenho adulto e MOE a correlação foi de 0,18 (p-valor 0,0000) e para o lenho juvenil e MOE os valores foram de -0,41 (p-valor 0,0000). Isso pode indicar que a presença do lenho juvenil influencia de forma mais acentuada no MOE, do que no lenho adulto. No entanto, ressalta-se que a influência mencionada é linear, embora a correlação entre lenho adulto e MOE seja considerada fraca, não se descarta a possibilidade de o lenho adulto influenciar no MOE de modo não linear, e por esse motivo, pode não ter sido constatado nesta análise específica.

Quando o MOE era em média 7.000 MPa (C14), a área mínima média de lenho juvenil em uma tábua resultou ser de 60% ou menos. Já no MOE de

11.000 MPa (classe estrutural C24), observou-se que em média, pelo menos 60% da madeira presente na tábua era proveniente de lenho adulto.

Pela norma brasileira NBR 7190 – 2 (ABNT, 2022b), as tábuas com aproximadamente 40% de lenho juvenil foram classificadas como Classe 1.

As equações 11 e 12 foram obtidas da correlação. Hipoteticamente, ao necessitar-se que uma tábua tenha um MOE de no mínimo 7.000 MPa, o resultado indica que aproximadamente 60% da madeira precisaria ser lenho adulto.

$$LA = 0,0018x + 47,52 \quad \text{Equação 11.}$$

$$LJ = 0,0042x + 91,07 \quad \text{Equação 12.}$$

Embora grande parte dos dados estejam concentrados entre 6.000 e 15.000 MPa, a maior amplitude do MOE (5.000 a 40.000) no sortimento A, pode ser devido ao aumento no diâmetro das toras. No *Pinus*, o impacto da variação radial é mais pronunciada e ocasiona valores de MOE com grandes variações (VAUGHAN *et al.*, 2020; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; BURKHART; TOMÈ, 2012). As grandes variações do MOE também foram observadas por Nascimento, Oliveira e Della Lucia (2001), Carreira e Dias (2005) e Ballarin, Ballarin e Calil Junior (2017), que avaliaram peças de *Pinus* pelo MOE e classificação visual.

Essa variação ainda pode ter tido influência da presença ou ausência de nós em algumas tábuas, já que os nós afetam as propriedades mecânicas e o grau de influência depende da proporção que o nó ocupa na tábua (HOSSEIN; SHAHVERDI; ROOHNIA, 2011). Como as toras do sortimento A tinham grandes dimensões, as tábuas provenientes das zonas internas (P₁ e P₂) apresentaram abundância de nós, enquanto nas externas houve maior quantidade de tábuas limpas.

Os resultados da correlação corroboraram essa tendência (Tabela 21), sendo que entre os dados de lenho adulto e a densidade, a correlação foi de 0,4507 (p-valor 0,0000) e no lenho juvenil os valores foram inversos, com correlação de -0,4514 (p-valor 0,0000). Isso pode ser devido ao fato do lenho juvenil ter menores densidades em relação ao lenho adulto, e que, a densidade diminui ao aumentar a quantidade de lenho juvenil em uma tábua. Visto que

estudos anteriores concluíram que o lenho juvenil apresenta menor densidade que o lenho adulto (BENDTSEN; SENFT, 1986; ZOBEL; SPRAGUE, 1998; MOORE; LYON; LEHNEKE, 2012; POLLET *et al.*, 2017; ERASMUS *et al.*, 2018).

Tabela 21 - Correlações de Pearson para as variáveis, Posição × MOE e Posição × Densidade aparente para as tábuas do sortimento A.

Densidade aparente					
	P _{,1}	P _{,2}	P _{,3}	P _{,4}	P _{,5}
Densidade	-0,4016	-0,2196	0,2594	0,3572	0,1354
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002
	P _{,12}	P _{,123}	P _{,1234}	P _{,12345}	P _{,23}
Densidade	-0,4514	-0,3328	-0,1331	-0,0028 ^{NS}	0,0206 ^{NS}
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0003	0,9391	0,5753
	P _{,234}	P _{,2345}	P _{,34}	P _{,345}	P _{,45}
Densidade	0,3007	0,3991	0,4273	0,4510	0,3334
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
MOE					
	P _{,1}	P _{,2}	P _{,3}	P _{,4}	P _{,5}
MOE	-0,4255	-0,1310	0,3073	0,2801	0,0665
(p-valor)	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0634 ^{NS}
	P _{,12}	P _{,123}	P _{,1234}	P _{,12345}	P _{,23}
MOE	-0,4064	-0,2398	-0,0688	-0,0205	0,1304
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0552 ^{NS}	0,5684	0,0003
	P _{,234}	P _{,2345}	P _{,34}	P _{,345}	P _{,45}
MOE	0,3610	0,4214	0,4120	0,4045	0,2389
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

P_{,1} – posição com zero a seis anéis cambiais; P_{,2} – posição com seis a 12; P_{,3} – posição com 12 a 18; P_{,4} – posição com 18 a 24; P_{,5} – posição com 24 a 30; P_{,12} – posição com zero a 12; P_{,123} – posição com zero a 18; P_{,1234} – posição com zero a 24; P_{,12345} – posição com zero a 30; P_{,23} – posição com 12 a 18; P_{,234} – posição com 12 a 24; P_{,2345} – posição com 12 a 30; P_{,34} – posição com 18 a 24; P_{,345} – posição com 18 a 30; P_{,45} – posição com 24 a 30 anéis de crescimento.

Fonte: A autora (2023).

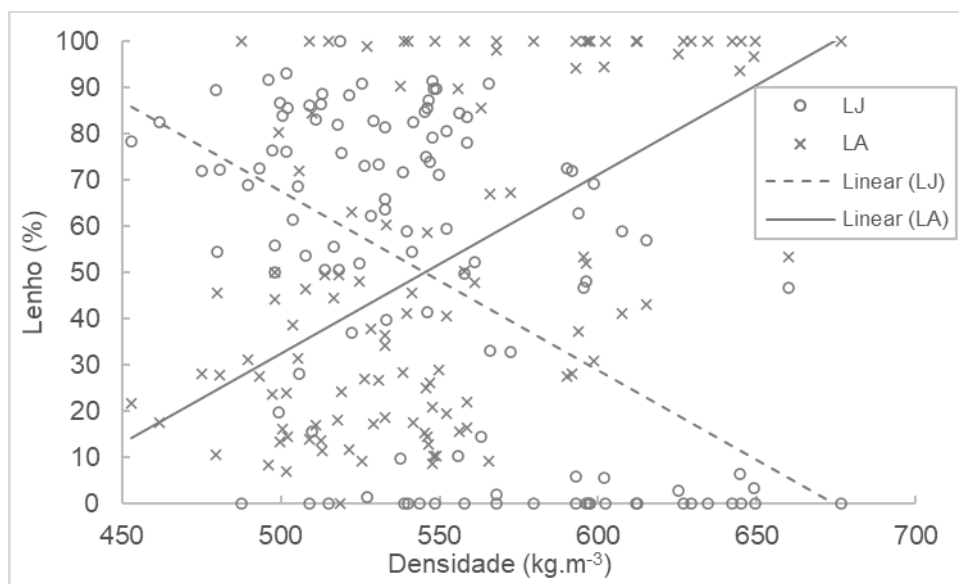
Embora as correlações indiquem um aumento das propriedades no sentido radial, raramente uma tábua terá em sua composição a presença de apenas uma posição. Assim, os resultados para as posições em conjunto foram interessantes. Nas posições em conjunto que há a presença da P_{,1}, todas

apresentaram correlação negativa com o MOE, isto foi um indicativo da grande influência do lenho juvenil de diminuir os valores médios nessa propriedade.

Já em relação a $P_{2,2}$, observou-se que quando sozinha, existe uma correlação negativa com o MOE. Mas nas tábuas que a $P_{2,2}$ estava em conjunto com posições de lenho adulto, a correlação foi positiva e maior. Isto sinalizou a possibilidade de que o lenho juvenil da $P_{2,2}$ (seis a 12 anos) quando associado aos lenhos adultos, possa estar presente em tábuas para uso estrutural. No entanto, apenas pela análise de correlação não foi possível definir a quantidade máxima da $P_{2,2}$ para uma tábua ser classificada estrutural.

Na Figura 19, está ilustrado a interseção entre as áreas percentuais de cada posição com o ponto que indica a correspondente densidade para o sortimento B.

Figura 19 - Valores da densidade aparente (12%) para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de *Pinus taeda* provenientes do Sortimento B.



Fonte: A autora (2023).

Com a Figura 19 foi possível observar que a densidade aumentou ao diminuir a proporção de lenho juvenil e aumentar a de lenho adulto. Observou-se que a densidade ficou em torno de 550 kg.m⁻³ quando as tábuas apresentaram em média 50% de lenho juvenil.

Utilizando os valores de referência da norma brasileira NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b), obteve-se que quando houve 50% de lenho juvenil, a madeira foi classificada como Classe 2.

As equações 13 e 14 foram resultantes da correlação para os lenhos juvenil e adulto. Para este sortimento, devido a maior densidade do lote, qualquer tábua formada por lenho juvenil alcançaria os valores mínimos para ser classificada como Classe 2 pela norma brasileira.

$$LA = 0,387x - 160,94 \quad \text{Equação 13.}$$

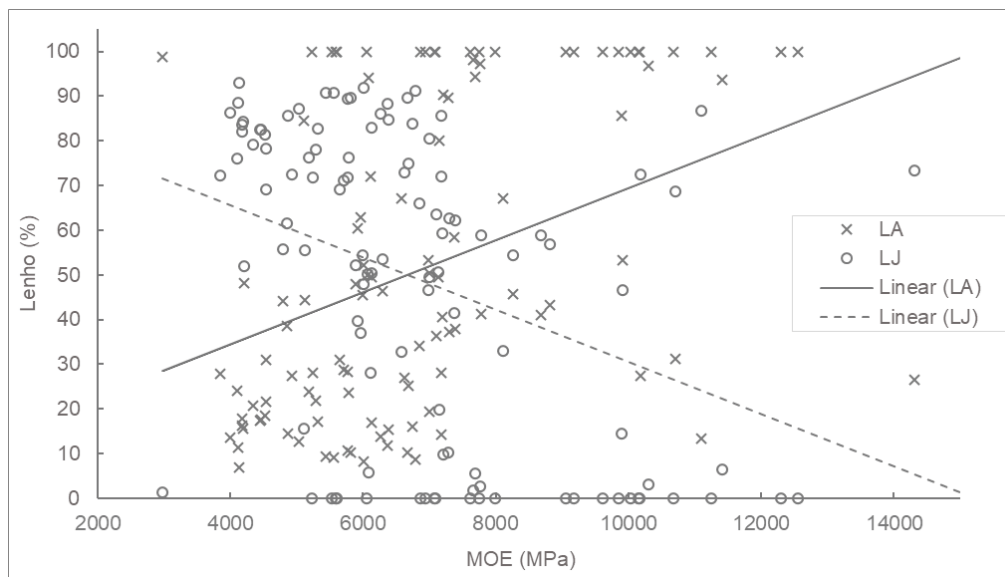
$$LJ = -0,387x + 260,94 \quad \text{Equação 14.}$$

Para o *Pinus* brasileiro, qualquer quantidade de lenho juvenil foi suficiente para uma tábua ser classificada como estrutural dentro da EN 338 pela densidade. Isso pode indicar que a densidade pode não representar a real classe de resistência da espécie ao utilizar a norma europeia para a classificação estrutural. Dessa forma, o uso de outras propriedades, como o MOE, se mostrou eficiente para a classificação do material dentro as classes estruturais. Isto foi comentado por Moore *et al.* (2013), os autores comentaram ser da natureza do sistema de classificação que uma das propriedades limite e restrinja a madeira a uma classe menor. Por isso, a classificação normalmente utiliza mais de uma propriedade.

Na Figura 20, está ilustrado a interseção entre as proporções de cada posição com o ponto que indica o correspondente MOE.

Quando a proporção de lenho juvenil foi menor que 45%, o MOE ficou em torno de 7.000 MPa. Também foi possível observar que as proporções do tipo de lenho variaram conforme o valor MOE. Quando o MOE foi menor, a proporção de lenho juvenil foi maior, mas o comportamento foi inverso quando houve maior proporção de lenho adulto.

Figura 20 - Valores do MOE para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de *Pinus taeda* provenientes do Sortimento B.



Fonte: A autora (2023).

As equações 15 e 16 foram obtidas da correlação. Hipoteticamente, ao necessitar-se que uma tábua tenha um MOE de no mínimo 7.000 MPa, o resultado indica que aproximadamente 48% da madeira precisaria ser lenho juvenil.

$$LA = 0,0058x + 11,03 \quad \text{Equação 15.}$$

$$LJ = -0,0058x + 88,97 \quad \text{Equação 16.}$$

Adicionalmente, o lenho juvenil tendeu a apresentar menor rigidez quando comparado ao lenho adulto. Isso pode significar que o MOE aumentará à medida que a proporção de lenho adulto aumenta. Em um comportamento oposto, o MOE será menor, quando a proporção de lenho juvenil na tábua for maior. O aumento do MOE no sentido radial, do lenho juvenil para o lenho adulto é consistente com os resultados de outros estudos. Isso foi averiguado para diferentes espécies de madeira de coníferas e de folhosas, e se constatou que as tábuas provenientes de regiões mais próximas do núcleo terão um menor MOE (BAO *et al.*, 2001; KOPONEN *et al.*, 2005; MOORE; LYON; LEHNEKE, 2012).

Adicionalmente, verificou-se que tábuas cuja proporção de lenho juvenil era de aproximadamente 25% puderam ser classificadas como Classe 1 pela

norma brasileira NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b), por apresentaram os valores mínimos do MOE na classe. Para a Classe 3, menos restritiva, a proporção de lenho juvenil máxima foi de aproximadamente 60%. Pela norma europeia EN 338 (EN, 2016a), para uma tábua ser considerada na menor classe estrutural (C14) foi necessária uma área máxima de cerca de 45%. Para a classe C24, amplamente utilizada em painéis MLCC, o lenho juvenil máximo presente em uma tábua foi de 25%.

Ressalta-se que os baixos valores de MOE, aliados aos altos valores da densidade, podem ter ocorrido devido à presença de nós, uma vez que eles podem afetar negativamente o MOE e aumentar a densidade (KRETSCHMANN, 2010; HOSSEIN; SHAHVERDI; ROOHNIA, 2011). Embora os defeitos naturais não tenham sido avaliados nesta análise, observou-se que apenas três tábuas não apresentavam nenhum nó ou outro defeito (madeira limpa). O efeito dos nós nas propriedades mecânicas, como afirmado por Hossein, Shahverdi e Roohnia (2011), depende da proporção de madeira ocupada pelos nós. Além disso, os locais de crescimento e o manejo silvicultural também podem afetar a proporção dos nós e a largura dos anéis de crescimento, sendo que o aumento ou diminuição de uma dessas propriedades pode influenciar no MOE das tábuas.

Na Tabela 22 tem-se as correlações de Pearson que indicaram que as posições $P_{,1}$ e $P_{,2}$ possuem correlação negativa com o MOE. O comportamento foi inverso quando foram consideradas as posições $P_{,3}$, $P_{,4}$ e $P_{,5}$. Nas tábuas em que havia mais de uma posição, a presença da $P_{,1}$ indicou correlação negativa com o MOE, conforme observado nas variáveis $P_{,123}$ e $P_{,1234}$. As posições mistas $P_{,12345}$, $P_{,2345}$, $P_{,234}$, $P_{,34}$, $P_{,345}$ e $P_{,45}$ apresentaram correlações positivas com o MOE. Observou-se que para a $P_{,12345}$ a presença da $P_{,1}$ não apresentou correlação negativa. Os resultados de densidade seguiram a mesma tendência de comportamento do MOE.

As correlações de Pearson indicaram que as posições $P_{,1}$ e $P_{,2}$ tiveram uma correlação negativa com MOE e densidade. Essa evidência corroborou o fato de o lenho juvenil apresentar menor rigidez, uma vez que o ângulo da microfibrila tem maior influência no MOE, devido ao seu menor ângulo nos primeiros anos de crescimento. Este resultado destaca o aumento do MOE na direção radial da árvore (MOORE; LYON; LEHNEKE, 2012).

Tabela 22 - Correlações de Pearson para as variáveis, Posição × MOE e Posição × Densidade aparente para as tábuas do sortimento B.

Densidade aparente					
	P _{,1}	P _{,2}	P _{,3}	P _{,4}	P _{,5}
Densidade	-0,4782	-0,3307	0,1367	0,4711	0,3986
(p-valor)	0,0000	0,0004	0,1508	0,4711	0,3985
	P _{,123}	P _{,1234}	P _{,12345}	P _{,23}	P _{,234}
Densidade	-0,5382	-0,3986	0,3366	-0,1690	0,2032
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0003	0,0749	0,0316
	P _{,2345}	P _{,34}	P _{,345}	P _{,45}	
Densidade	0,0940	0,3898	0,4019	0,4608	
(p-valor)	0,3242	0,0000	0,0000	0,0000	
MOE					
	P _{,1}	P _{,2}	P _{,3}	P _{,4}	P _{,5}
MOE	-0,4019	-0,4643	0,2069	0,4651	0,3828
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0286	0,0000	0,0000
	P _{,123}	P _{,1234}	P _{,12345}	P _{,23}	P _{,234}
MOE	-0,5255	-0,3828	0,3850	-0,2243	0,1396
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0174	0,1422
	P _{,2345}	P _{,34}	P _{,345}	P _{,45}	
MOE	0,0749	0,4354	0,4321	0,4799	
(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	

P_{,1} – posição com zero a seis anéis cambiais; P_{,2} – posição com seis a 12; P_{,3} – posição com 12 a 18; P_{,4} – posição com 18 a 24; P_{,5} – posição com 24 a 30; P_{,123} – posição com zero a 18; P_{,1234} – posição com zero a 24; P_{,12345} – posição com zero a 30; P_{,23} – posição com 12 a 18; P_{,234} – posição com 12 a 24; P_{,2345} – posição com 12 a 30; P_{,34} – posição com 18 a 24; P_{,345} – posição com 18 a 30; P_{,45} – posição com 24 a 30 anéis de crescimento.

Fonte: A autora (2023).

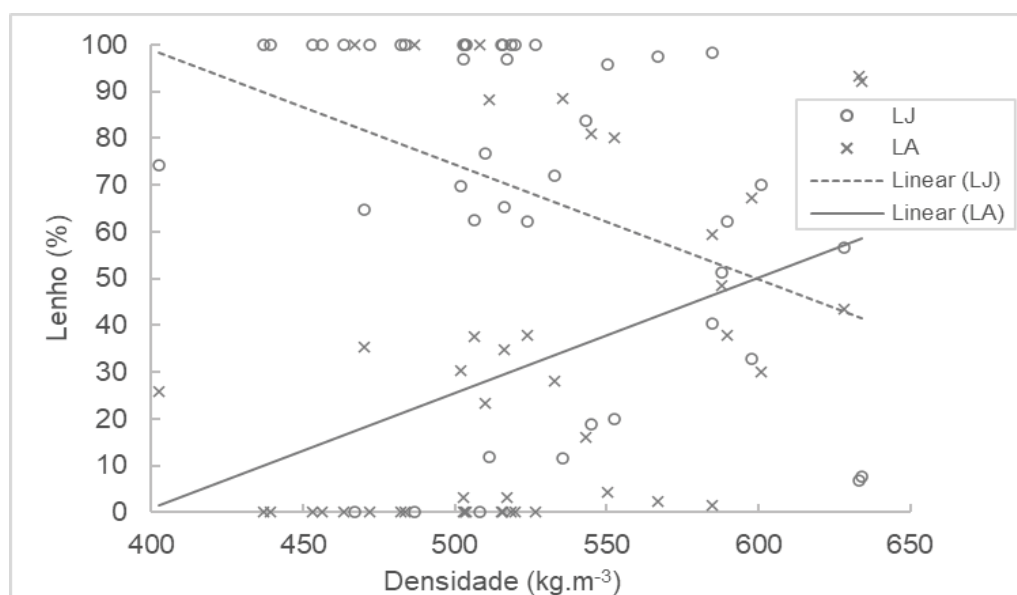
No entanto, como a maioria das tábuas não apresentava a presença de apenas uma posição, outras inferências puderam ser realizadas ao analisar as posições em conjunto. O MOE teve correlação negativa com as posições mistas que tiveram a presença da P_{,1}, exceto a P_{,12345}. Devido à presença da P_{,5} na tábua, parece que ocorreu balanceamento entre as propriedades da P_{,1} e da P_{,5}, criando um valor de MOE mais alto. Como a P_{,1234} não apresentou correlação positiva, pode ser um indicativo que apenas a presença da P_{,4} não é suficiente para equilibrar a variabilidade da P_{,1}. Este comportamento é semelhante às posições mistas P_{,23}, pois como a P_{,2} é uma posição de lenho juvenil e a P_{,3} um lenho de transição, as correlações são negativas quando a

P₃ está associada à P₁ ou P₂. No entanto, a correlação tornou-se positiva quando a P₃ foi associada a P₄ ou P₅. Diante disso, a P₂ parece indicar um menor MOE, mas se essa posição estiver presente com a P₄ e P₅, cria-se um equilíbrio, permitindo o uso desse lenho juvenil em uma tábua a ser classificada como estrutural.

Esses resultados correspondem com outros estudos sobre o lenho de transição. Para muitas espécies, a região interna da madeira, que corresponde ao lenho juvenil, apresentou menor MOE, principalmente quando as toras foram colhidas em idades jovens. O menor MOE foi correlacionado com o ângulo de microfibrila, uma vez que as árvores jovens requerem mais flexibilidade para evitar fraturas em exposições de carga de vento (MOORE; LYON; LEHNEKE, 2012; WESSELS *et al.*, 2011; RAIS *et al.*, 2014; ERASMUS *et al.*, 2018).

Na Figura 21, pode-se observar a interseção entre as áreas em percentual de cada posição com o ponto que indica a correspondente densidade para o Sortimento C.

Figura 21 - Valores da densidade aparente (12%) para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de *Pinus taeda* provenientes do Sortimento C.



Fonte: A autora (2023).

Com a Figura 21 foi possível observar que a densidade aumentou ao diminuir a proporção de lenho juvenil e aumentar a de lenho adulto. Quando o lenho juvenil foi 50%, a densidade variou em torno de 600 kg.m⁻³.

Utilizando os valores de referência da norma brasileira NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b), para a densidade, a madeira foi classificada na Classe 2 com qualquer quantidade de lenho juvenil na tábua.

As equações 17 e 18 foram resultantes da correlação para os lenhos juvenil e adulto. Para este sortimento, uma tábua formada apenas lenho juvenil alcançaria os valores mínimos para ser classificada como Classe 2 pela norma brasileira.

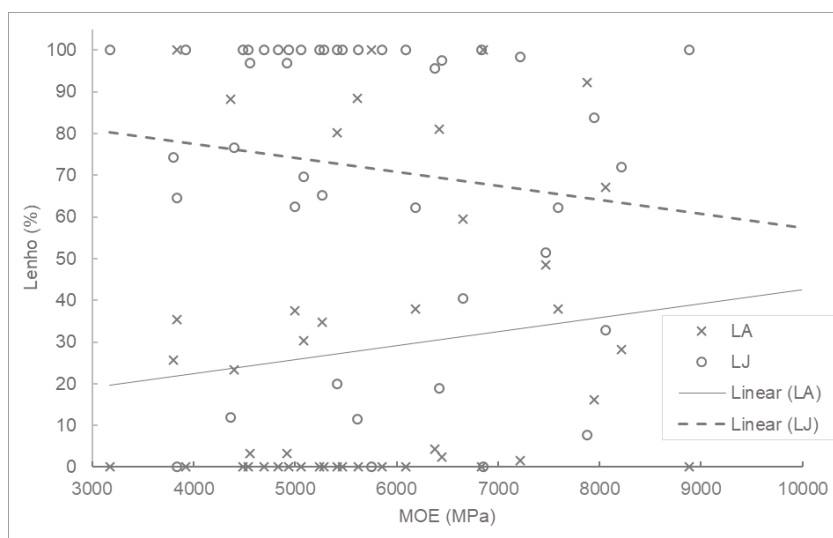
$$LA = 0,246x - 97,424 \quad \text{Equação 17.}$$

$$LJ = -0,246x + 197,42 \quad \text{Equação 18.}$$

Como a densidade não foi um fator limitante para determinar a classe de qualidade pela norma europeia, recorre-se a outra propriedade para a classificação do material dentro as classes estruturais.

Na Figura 22, está ilustrado a interseção entre as proporções de cada posição com o ponto que indica o correspondente MOE.

Figura 22 - Valores do MOE para diferentes quantidades de lenho juvenil (LJ) e lenho adulto (LA) em tábuas de *Pinus taeda* provenientes do Sortimento C.



Fonte: A autora (2023).

Assim como no Sortimento A e B, no C foi observada a tendência de o MOE aumentar com a diminuição do lenho juvenil. A linha de tendência indicou

que a partir de 30% de lenho adulto, a tábuas já apresentava MOE suficiente para ser considerada estrutural.

As equações 19 e 20 foram obtidas da correlação. Hipoteticamente, ao necessitar-se que uma tábuas tenha um MOE de no mínimo 7.000 MPa, o resultado indica que aproximadamente 32% da madeira precisaria ser lenho juvenil. Porém, foi observado que a maioria das tábuas tiveram proporções de lenho adulto menores do que 32%, indicando que esse material não alcança os valores mínimos para ser usado como estrutural.

$$LA = 0,0033x + 9,095 \quad \text{Equação 19.}$$

$$LJ = -0,0033x + 90,91 \quad \text{Equação 20.}$$

Notou-se que na prática, as tábuas desse sortimento tiveram menores valores de MOE e isso pode ter sido ocasionado pela alta presença de nós e pelo elevado ângulo da microfibrila que não foi avaliado nesse estudo.

A influência do maior número e tamanho de nós no menor MOE foi explicada por Nascimento, Oliveira e Della Lucia (2001). Os autores constataram que para a madeira de *Pinus* o aumento do nó impacta diretamente no MOE. Os resultados médios indicaram que tábuas com nó menor que 1/6 da área transversal possuem um MOE até 25% maior do que tábuas com nós maiores que 1/3 da área transversal.

Além disso, devido ao pequeno diâmetro das toras, poucas tábuas tiveram em sua composição a quantidade de lenho adulto (acima da P₄) superior a 30%. Assim, mesmo que a linha de tendência indique que acima de 30% de lenho adulto as tábuas sejam classificadas como estrutural, na prática, não há quantidade desse lenho suficiente nas tábuas desdobradas.

Adicionalmente, neste sortimento, o MOE foi um pouco menor, devido à grande parte da madeira ser proveniente de regiões próximas ao núcleo da tora (BAO *et al.*, 2001; KOPONEN *et al.*, 2005; MOORE; LYON; LEHNEKE, 2012).

Na Tabela 23, as correlações de Pearson, indicaram que as posições P₁ e P₂ tiveram correlação negativa com o MOE. O comportamento foi inverso quando foram consideradas as posições P₃ e P₄. Nos casos em que havia

mais de uma posição na tábua, a presença da $P_{,1}$ indicou correlação negativa com o MOE. A $P_{,2}$ embora ainda considerada lenho juvenil, quando associada aos lenhos de transição ($P_{,3}$) e lenho adulto ($P_{,4}$) apresentou correlações positivas com a propriedade. Isto foi um forte indicador de que tábuas com lenhos formados entre seis e 12 anos, quando associados a lenhos adultos, apresentam um aumento da propriedade. Assim, a $P_{,2}$ pode apresentar potencial para uso estrutural quando associada a lenhos mais velhos.

Tabela 23 - Correlações de Pearson para as variáveis, Posição × MOE e Posição × Densidade aparente para as tábuas do sortimento C.

Densidade aparente					
	$P_{,1}$	$P_{,2}$	$P_{,3}$	$P_{,4}$	
Densidade	-0,3523	-0,0680	0,4318	0,0495	
(p-valor)	0,0176	0,6573	0,0031	0,7467	
	$P_{,12}$	$P_{,123}$	$P_{,23}$	$P_{,234}$	$P_{,34}$
Densidade	-0,3657	0,1649	0,5300	0,5116	0,3035
(p-valor)	0,0135	0,2790	0,0002	0,0003	0,0427
MOE					
	P_1	P_2	P_3	P_4	
MOE	-0,1997	-0,2472	0,3732	0,2180	
(p-valor)	0,1883	0,1016	0,0116	0,1504	
	$P_{,12}$	$P_{,123}$	$P_{,23}$	$P_{,234}$	$P_{,34}$
MOE	-0,2592	-0,0279	0,2339	0,3874	0,3664
(p-valor)	0,0855	0,8558	0,1219	0,0086	0,0133

$P_{,1}$ – posição com zero a seis anéis cambiais; $P_{,2}$ – posição com seis a 12; $P_{,3}$ – posição com 12 a 18; $P_{,4}$ – posição com 18 a 24; $P_{,12}$ – posição com zero a 12; $P_{,123}$ – posição com zero a 18; $P_{,23}$ – posição com 12 a 18; $P_{,234}$ – posição com 12 a 24; $P_{,34}$ – posição com 18 a 24.

Fonte: A autora (2023).

Os resultados de densidade tiveram resultados similares ao MOE. No entanto, verificou-se um decréscimo na correlação entre a $P_{,3}$ e $P_{,4}$. Isto pode ser o resultado de alguma estabilização ou decréscimo da densidade em algum momento entre os 18 e 24 anéis cambiais, fazendo com que não ocorra uma correlação linear nessa zona da madeira. Complementarmente, verificou-se que a $P_{,1}$ quando associada a $P_{,3}$ apresenta correlação positiva com a densidade. Assim como nos sortimentos anteriores, o Sortimento B também apresenta correlações negativas para o MOE quando há a presença da $P_{,1}$.

4.6 MODELOS MÚLTIPLOS LINEARES

Neste tópico são apresentados os modelos de regressão linear múltiplos calculados para os sortimentos estudados. Os modelos com as melhores variáveis preditivas são descritos nas tabelas. Os resultados das ANOVAS e coeficientes das variáveis presentes nos modelos que não resultaram em boa predição dos dados para a densidade e MOE estão descritos no Apêndice 3.

Na Tabela 24 estão apresentados os melhores modelos para o Sortimento A. Os melhores modelos foram os com a melhor predição dos dados, escolhidos em função do coeficiente de determinação, nível de significância da ANOVA, valores p dos coeficientes e análise dos resíduos. Entre os modelos gerais executados com e sem o intercepto b0, ajustaram-se melhor os modelos sem o intercepto b0. O modelo ρ_2 teve a posição $P_{,12345}$ sem significância (p-valor 0,8722). Assim, a variável foi excluída e um novo modelo foi calculado, sendo o resultado indicado na Tabela 24.

Tabela 24 - Modelos de regressão múltipla linear para a densidade (ρ) em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento A (toras com diâmetro de 430 a 550 mm).

Modelos	R^2 / R^2_{aj}
Presença da Posição	
$(\rho_1) \rho = 482,4(P_{,12}) + 489,8(P_{,123}) + 501,8(P_{,1234}) + 535,9(P_{,12345}) + 518,3(P_{,23})$ $+ 532,3(P_{,234}) + 536,7(P_{,2345}) + 536,0(P_{,34}) + 551,2(P_{,345}) + 540,0(P_{,45})^{***}$	0,99/0,99
%	
$(\rho_2) \rho = 4,8(P_{,12}) - 2,4(P_{,123}) + 0,59(P_{,1234}) + 5,0(P_{,23}) - 2,4(P_{,234}) + 0,8(P_{,2345})$ $+ 5,2(P_{,34}) - 2,5(P_{,345}) + 5,2(P_{,45})^{***}$	0,98/ 0,98
% Posições individuais	
$(\rho_3) \rho = 4,7(P_{,1}) + 5,0(P_{,2}) + 5,4(P_{,3}) + 5,6(P_{,4}) + 5,3(P_{,5})$	0,99/0,98

* coeficientes com p-valor<0,05; ** coeficientes com p-valor<0,01; ***coeficientes com p-valor<0,0001; R^2 – coeficiente de determinação; R^2_{aj} – coeficiente de determinação ajustado; ρ – densidade aparente a 12%; $P_{,12}$ – posição com zero a 12 anéis cambiais; $P_{,123}$ – posição com zero a 18; $P_{,1234}$ – posição com zero a 24; $P_{,12345}$ – posição com zero a 30; $P_{,23}$ – posição com 12 a 18; $P_{,234}$ – posição com 12 a 24; $P_{,2345}$ – posição com 12 a 30; $P_{,34}$ – posição com 18 a 24; $P_{,345}$ – posição com 18 a 30; $P_{,45}$ – posição com 24 a 30; $P_{,1}$ – posição com zero a seis; $P_{,2}$ – posição com seis a 12; $P_{,3}$ – posição com 12 a 18; $P_{,4}$ – posição com 18 a 24; $P_{,5}$ – posição com 24 a 30 anéis cambiais.

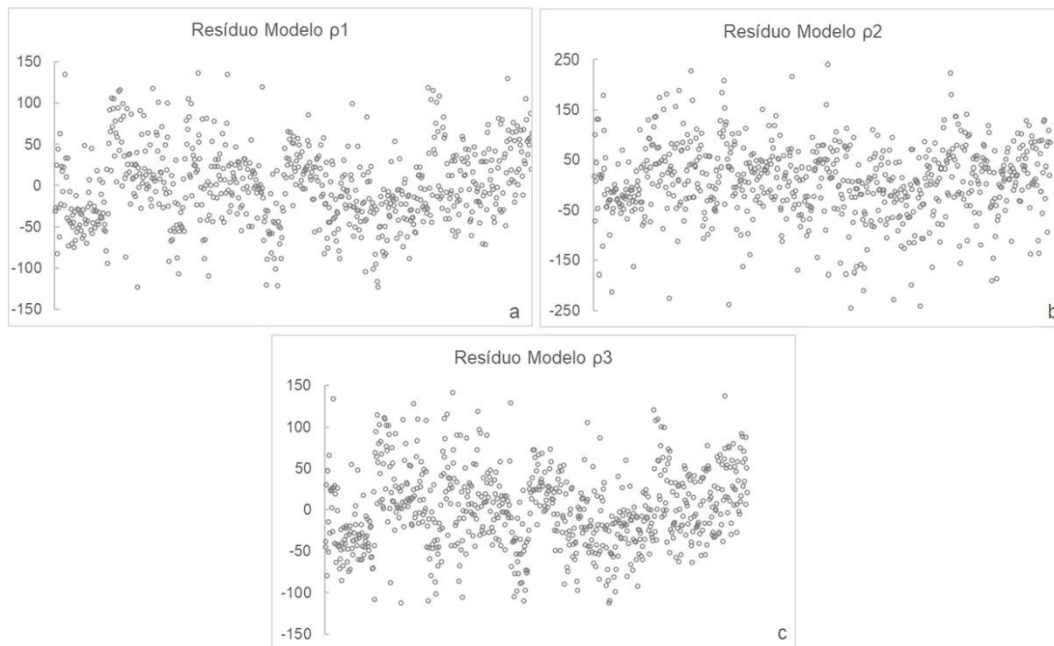
Fonte: A autora (2023).

Pelo modelo p_1 observa-se que há um aumento da propriedade no sentido radial, conforme se adiciona o lenho adulto ou isola o lenho juvenil. Em média, ao adicionar anos cambiais nas tábuas tem-se um aumento da densidade. Resultado similar a estudos que relataram que a densidade tende a aumentar no sentido radial em direção a casca (LARSON *et al.*, 2001; TRIANOSKI *et al.*, 2013; HEIN; SILVA; BRANCHERIAU, 2013; MELO, 2015; PALERMO *et al.*, 2013; WESSELS *et al.*, 2015). Adicionalmente, deve-se considerar a grande variação da densidade entre os lenhos inicial e tardio. Em um estudo avaliando a densidade entre os lenhos inicial e tardio, Koubaa *et al.* (2002) constataram alta variação da densidade no lenho tardio. Em alguns casos, um leve decréscimo da densidade foi observado entre o 15.º e 25.º anel cambial. Assim, a leve diminuição da densidade observado pelo modelo entre as P_{345} e P_{45} pode ser devido a fatores intra anéis que não estão sendo considerados neste modelo.

Na Figura 23 estão apresentados os resíduos para os modelos da densidade que resultaram em melhor predição dos dados. Ao excluir o intercepto b_0 das análises de regressão linear múltipla houve um aumento no valor dos resíduos, ou seja, estavam mais afastados de zero (Figura 23b). Contudo, embora o modelo sem o intercepto apresente resíduos um pouco maiores, o modelo com o intercepto b_0 teve quase todas as variáveis não significativas, e a estatística F e o coeficiente de determinação foram baixos. Esse comportamento foi observado apenas para o modelo p_2 que considerou as variáveis quantitativas. No modelo p_1 a análise de resíduos foi semelhante entre os modelos com e sem o intercepto (Figura 23a).

Devido à grande variabilidade presente no material, em parte causada pela variação dentro de uma mesma árvore (variação radial), houve uma grande dispersão dos resíduos com valores variando de aproximadamente -100 a 150. No entanto, observa-se que grande parte dos dados se ajustou mais próximo aos valores de zero. Isso pode ser um indicativo que para a densidade, os modelos conseguem ter uma boa previsão dos dados com relação à área de cada posição (lenho) presente em uma tábua.

Figura 23 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos da densidade p_1 , p_2 e p_3 para o sortimento A (diâmetro de 430 a 550 mm).



Fonte: A autora (2023).

O modelo p_1 apresentou melhor ajuste dos dados do que o modelo p_2 . Isso pode ser devido ao modo que os lenhos são utilizados no modelo 1. Já que quando a variável é qualitativa, ao constatar a presença de um lenho já é suficiente para estimar uma densidade média. Para o modelo 2, devido à grande variabilidade dos lenhos, ao utilizar as quantidades parciais de lenhos ao invés do total, cria-se uma maior dispersão dos dados. Como nesse modelo, não foram utilizadas outras variáveis, *e.g.* a quantidade de lenho tardio, o modelo não consegue responder à variação na tábuca, ocasionando maiores resíduos. A inserção da largura do lenho tardio foi recomendada por Pollet *et al.* (2017), os autores afirmaram que essa variável pode aumentar o grau de precisão do modelo. Contudo, não se descarta a influência de fatores como sítio, procedência genética, características anatômicas na variabilidade da madeira.

No modelo 3, a maioria dos dados foi previsto de modo que grande parte dos resíduos se concentrassem entre -50 a 50, indicando um bom ajuste e boa previsão dos resultados.

Os modelos também foram ajustados para o MOE. Na Tabela 25 estão apresentados os melhores modelos escolhidos em função do coeficiente de

determinação, nível de significância da ANOVA, valores p dos coeficientes e análise dos resíduos. Em ambos os modelos com variáveis qualitativas e quantitativas, ajustaram-se melhor os modelos sem o intercepto b_0 .

Tabela 25 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente MOE em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento A (diâmetro de 430 a 550 mm).

Modelos	R^2 / R^2_{adj}
Presença da Posição	
(MOE ₁) $MOE = 7.845(P_{,12}) + 9.532(P_{,123}) + 10.401(P_{,1234}) + 11.834(P_{,12345}) + 11.815(P_{,23}) + 12.004(P_{,234}) + 11.120(P_{,2345}) + 12.180(P_{,34}) + 13.188(P_{,345}) + 11.934(P_{,45})^{***}$	0,91/0,90
%	
(MOE ₂) $MOE = 77,8(P_{,12}) - 38,4(P_{,123}) + 112,3(P_{,23}) - 51,4(P_{,234}) + 117,3(P_{,34}) - 46,7(P_{,345}) + 113,6(P_{,45})^{***}$	0,90/0,89
% Posições individuais	
(MOE ₃) $MOE = 70,2(P_{,1}) + 100,5(P_{,2}) + 130,2(P_{,3}) + 123,3(P_{,4}) + 112,4(P_{,5})$	0,91/0,90

* coeficientes com p -valor $<0,05$; ** coeficientes com p -valor $<0,01$; ***coeficientes com p -valor $<0,0001$; * coeficientes com p -valor $<0,05$; ** coeficientes com p -valor $<0,01$; ***coeficientes com p -valor $<0,0001$; R^2 – coeficiente de determinação; R^2_{aj} – coeficiente de determinação ajustado; MOE – módulo de elasticidade à flexão; $P_{,12}$ – posição com zero a 12 anéis cambiais; $P_{,123}$ – posição com zero a 18; $P_{,1234}$ – posição com zero a 24; $P_{,12345}$ – posição com zero a 30; $P_{,23}$ – posição com 12 a 18; $P_{,234}$ – posição com 12 a 24; $P_{,2345}$ – posição com 12 a 30; $P_{,34}$ – posição com 18 a 24; $P_{,345}$ – posição com 18 a 30; $P_{,45}$ – posição com 24 a 30; $P_{,1}$ – posição com zero a seis; $P_{,2}$ – posição com seis a 12; $P_{,3}$ – posição com 12 a 18; $P_{,4}$ – posição com 18 a 24; $P_{,5}$ – posição com 24 a 30 anéis cambiais.

Fonte: A autora (2023).

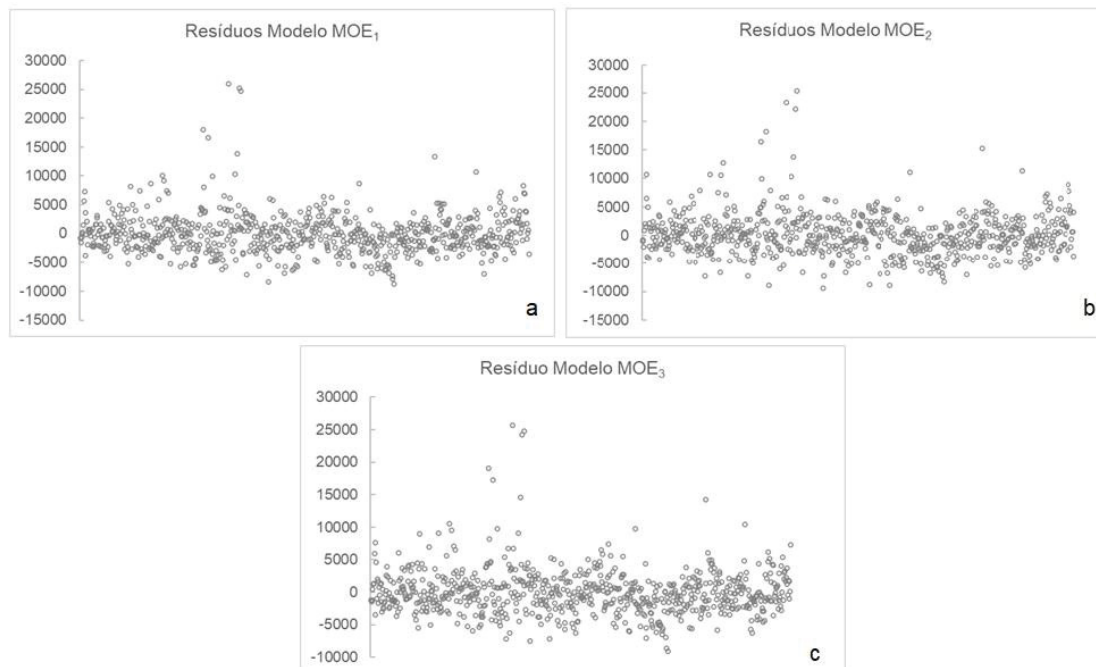
Os modelos estimaram valores médios do MOE e tábuas que apresentaram valores muito baixos ou altos não foram bem estimadas nesses modelos. Isso pode indicar que apenas a quantidade de lenho não foi suficiente para explicar o MOE e que a grande variabilidade da propriedade pode ser influenciada por outro fator, como o ângulo da microfibrila, já que esta propriedade é muito variável até os 20 primeiros anos cambiais no *Pinus taeda* e apresenta alta correlação com o MOE (CLARK *et al.*, 2008; VIKRAM *et al.*, 2011; DAHLEN; AUTY; EBERHARDT, 2018).

Pelo modelo MOE₁ observa-se que há um aumento da propriedade no sentido radial conforme se adiciona o lenho adulto ou isola o lenho juvenil. Em média, ao adicionar anos cambiais nas tábuas tem-se um aumento do MOE. O

mesmo ocorre ao obter tábuas das zonas externas da tora isolando os anos cambiais juvenis, *e.g.*, P_{12} .

Na Figura 24 estão apresentados os resíduos para os modelos do MOE que resultaram em melhor predição dos dados. Como nos modelos da densidade, esperava-se que ao excluir o intercepto b_0 das análises de regressão ocorresse um aumento nos resíduos, contudo, isso não ocorreu. Ao comparar os resíduos entre os modelos com e sem intercepto, não se notou diferença entre os resíduos. Isso indicou que tanto os modelos com intercepto quanto o sem intercepto tenderam a estimar os valores iguais ou muito próximos. Grande parte dos dados tiveram resíduos próximos a zero, sugerindo que o modelo consegue prever o MOE para a grande parte dos dados. A análise de resíduos não indicou uma tendência de super ou subestimar os dados. Mas deve-se considerar que o valor dos resíduos difere de zero e melhorias do modelo podem ser consideradas em estudos futuros, como a largura dos anéis de crescimento (MOORE; LYON; LEHNEKE, 2012).

Figura 24 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos de módulo de elasticidade MOE_1 , MOE_2 e MOE_3 para o sortimento A (diâmetro de 430 a 550 mm).



Fonte: A autora (2023).

Ambos os modelos 1 e 2 fornecem informações úteis para o entendimento da dinâmica entre os lenhos presentes em uma mesma tábua. No entanto, apenas os modelos que consideram as variáveis independentes como qualitativas apresentam praticidade para serem utilizados na classificação das tábuas. O modelo 3, no que lhe concerne, permitiu a estimativa das propriedades (densidade e MOE) para diferentes quantidades de lenho. Isto, eventualmente, poderá facilitar a decisão do diagrama de corte de uma tora, pois com um planejamento prévio, pode-se ter uma determinada quantidade de tábuas destinadas a diferentes produtos à base de madeira com suas propriedades estimadas antes do corte. No entanto, ressalta-se que este modelo foi baseado em uma população de *Pinus* e que responde apenas aos dados dessa população.

Na Tabela 26 estão apresentados os melhores modelos com a melhor predição dos dados para o Sortimento B. Entre os modelos gerais executados com e sem o intercepto b_0 , ajustaram-se melhor os modelos sem o intercepto b_0 .

Tabela 26 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente densidade (ρ) em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento B (diâmetro de 350 a 450 mm).

Modelos	R^2 / R^2_{adj}
Presença da Posição	
$(\rho_1) \rho = 525,2(P_{,123}) + 529,8(P_{,1234}) + 522,0(P_{,12345}) + 564,8(P_{,23}) + 564,0(P_{,234}) + 562,0(P_{,2345}) + 565,1(P_{,34}) + 588,9(P_{,345}) + 620,7(P_{,45})^{***}$	0,99/0,98
%	
$(\rho_2) \rho = 8,0(P_{,12}) - 4,1(P_{,123}) + 4,7(P_{,23}) - 1,6(P_{,234}) + 5,3(P_{,34}) - 2,6(P_{,345}) + 5,9(P_{,45})^{***}$	0,98/0,97
% Posições individuais	
$(\rho_3) \rho = 4,9(P_{,1}) + 5,4(P_{,2}) + 5,5(P_{,3}) + 6,0(P_{,4}) + 6,2(P_{,5})$	0,99/0,98

* coeficientes com p -valor $<0,05$; ** coeficientes com p -valor $<0,01$; ***coeficientes com p -valor $<0,0001$; R^2 – coeficiente de determinação; R^2_{aj} . – coeficiente de determinação ajustado; ρ – densidade aparente a 12%; $P_{,12}$ – posição com zero a 12 anéis cambiais; $P_{,123}$ – posição com zero a 18; $P_{,1234}$ – posição com zero a 24; $P_{,12345}$ – posição com zero a 30; $P_{,23}$ – posição com 12 a 18; $P_{,234}$ – posição com 12 a 24; $P_{,2345}$ – posição com 12 a 30; $P_{,34}$ – posição com 18 a 24; $P_{,345}$ – posição com 18 a 30; $P_{,45}$ – posição com 24 a 30; $P_{,1}$ – posição com zero a seis; $P_{,2}$ – posição com seis a 12; $P_{,3}$ – posição com 12 a 18; $P_{,4}$ – posição com 18 a 24; $P_{,5}$ – posição com 24 a 30 anéis cambiais.

Fonte: A autora (2023).

Para prever a densidade pela presença/ausência da posição, o modelo p_1 teve todas as variáveis significativas. O Modelo p_2 teve as posições $P_{,1234}$, $P_{,12345}$ e $P_{,2345}$ não significativas (p-valor 0,0675, 0,6786 e 0,0697). Assim, as variáveis foram excluídas e um novo modelo foi calculado.

Pelo modelo p_1 observou-se que houve um aumento da propriedade no sentido radial. Este comportamento, assim como no Sortimento A, pode ter ocorrido devido a adição dos anéis cambiais nas tábuas que gerou um aumento da densidade. Isto pode ser explicado por outros estudos, em que foi observado um aumento da neste sentido (LARSON *et al.*, 2001; TRIANOSKI *et al.*, 2013; HEIN; SILVA; BRANCHERIAV, 2013; MELO, 2015; PALERMO *et al.*, 2013; WESSELS *et al.*, 2015).

Mas diferentemente do Sortimento A, no sortimento B a posição $P_{,45}$, não teve um decréscimo na densidade em relação à posição $P_{,345}$. Como eram toras provenientes de sítios diferentes, não se descarta a variação da densidade entre e intra árvores e a variação da densidade entre os lenhos inicial e tardio (KOUBAA *et al.*, 2002). Assim, a tendência de a densidade diminuir ou aumentar entre os sortimentos, pode ser devido a fatores que não estão sendo considerados neste modelo.

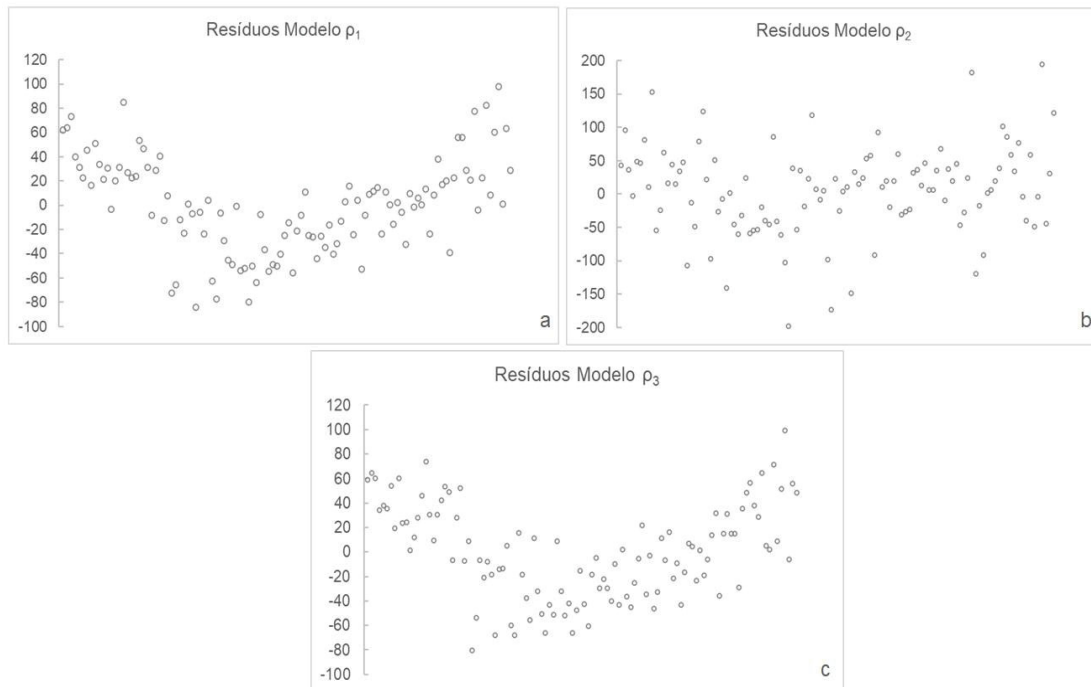
No modelo p_3 observa-se que os coeficientes angulares da reta tenderam a aumentar conforme os lenhos passavam de lenho juvenil para o lenho adulto, indicando que a densidade aumenta no sentido radial.

Na Figura 25 estão apresentados os resíduos para os modelos da densidade que resultaram em melhor predição dos dados. A análise de normalidade (Teste de Kolmogorov – Smirnov) dos resíduos com α 0,05, validou a hipótese nula, indicando que os resíduos apresentam distribuição normal.

Ao excluir o intercepto b_0 das análises de regressão linear múltipla não foi constatado um aumento no valor dos resíduos entre o modelo com e sem o intercepto (Figura 25b). Embora os gráficos de resíduos para os modelos p_1 e p_3 pareçam ter certa tendência não linear, isso não é um fato, visto que os dados não estão organizados crescentemente ou decrescente. Para tal análise, leva-se em conta, apenas, a distância do ponto em relação ao valor zero

(HAMBURG, 1967). Assim, não se constatou tendência de super ou subestimar os resultados, indicando um b_0 ajuste do modelo.

Figura 25 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos da densidade ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 para o sortimento B (diâmetro de 350 a 450 mm).



Fonte: A autora (2023).

Os modelos ρ_1 e ρ_3 tiveram uma boa dispersão dos resíduos ao redor do valor zero, com a maioria dos pontos variando de -40 a 40. Já no modelo ρ_2 , a maioria dos pontos ficou em média entre -60 e 60. Isto pode ter ocorrido devido à forma de modelar o modelo ρ_2 , que usa a quantidade de lenho nas tábuas, ocasionando um maior variabilidade do que no modelo ρ_1 , modelado apenas com a presença/ausência (0,1) dos lenhos. Por isso, o modelo ρ_2 se torna mais sensível às mudanças da quantidade de lenho do que o modelo ρ_1 , que utiliza a média.

Para a propriedade mecânica MOE, os resultados estão apresentados na Tabela 27 dos modelos de regressão linear múltipla, que tiveram o teste ANOVA estatisticamente significativo para os modelos.

Tabela 27 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente MOE em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento B (diâmetro de 350 a 450 mm).

Modelos	R ² /R ² _{adj}
Presença da Posição	
(MOE ₁) MOE = 5.527(P _{,123}) + 6.952(P _{,1234}) + 6.119(P _{,12345}) + 5.959(P _{,23}) + 7.102(P _{,234}) + 7.408(P _{,2345}) + 8.056(P _{,34}) + 9.134(P _{,345}) + 10.002(P _{,45}) ***	0,95/0,93
%	
(MOE ₂) MOE = 37,2(P _{,12}) – 15,3(P _{,234}) + 44,7(P _{,23}) + 78,4(P _{,34}) – 42,2(P _{,345}) + 95,0(P _{,45}) ***	0,94/0,92
% Posições individuais	
(MOE ₃) MOE = 56,9(P _{,1}) + 51,4(P _{,2}) + 80,1(P _{,3}) + 87,4(P _{,4}) + 101,7(P _{,5})	0,91/0,90

* coeficientes com p-valor<0,05; ** coeficientes com p-valor<0,01; ***coeficientes com p-valor<0,0001; * coeficientes com p-valor<0,05; ** coeficientes com p-valor<0,01; ***coeficientes com p-valor<0,0001; R² – coeficiente de determinação; R²_{aj.} – coeficiente de determinação ajustado; MOE – módulo de elasticidade à flexão; P_{,12} – posição com zero a 12 anéis cambiais; P_{,123} – posição com zero a 18; P_{,1234} – posição com zero a 24; P_{,12345} – posição com zero a 30; P_{,23} – posição com 12 a 18; P_{,234} – posição com 12 a 24; P_{,2345} – posição com 12 a 30; P_{,34} – posição com 18 a 24; P_{,345} – posição com 18 a 30; P_{,45} – posição com 24 a 30; P_{,1} – posição com zero a seis; P_{,2} – posição com seis a 12; P_{,3} – posição com 12 a 18; P_{,4} – posição com 18 a 24; P_{,5} – posição com 24 a 30 anéis cambiais.

Fonte: A autora (2023).

No modelo MOE₁ todos os coeficientes apresentaram p-valor significativos, enquanto o mesmo modelo com o intercepto teve quase todas as variáveis não significativas. O modelo tendeu a estimar menores valores para as posições com a presença de lenho juvenil e maiores valores para as posições com presença de lenho adulto. Nota-se que para tábuas formadas com os lenhos P_{,123} o MOE é quase 45% menor do que tábuas da posição P_{,34}, compostas apenas por lenho adulto. Como no Sortimento B não houve ocorrência de tábuas com apenas os lenhos P_{,12} (lenho juvenil), não é possível comparar com a P_{,34} (lenho adulto). Pelo modelo MOE₁ observou-se que há um aumento da propriedade no sentido radial conforme se adiciona o lenho adulto ou isola o lenho juvenil. Em média, ao adicionar anos cambiais nas tábuas tem-se um aumento da propriedade.

No modelo MOE₂ grande parte das variáveis foram rejeitadas por terem o p-valor superior ao nível de significância α 0,05, sendo as variáveis: P_{,123}, P_{,1234}, P_{,12345}, P_{,234} (p-valor 0,0846, 0,1193, 0,2520 e 0,4489, respectivamente). Um novo modelo foi calculado sem essas variáveis, que gerou o modelo MOE₂,

representado na Tabela 27. Assim, como na densidade, observou-se uma maior sensibilidade do modelo 2 por utilizar dados em percentual.

No modelo MOE₃ notou-se uma grande diferença entre o coeficiente angular da P₂ e P₃. O coeficiente angular indica o quanto a variável dependente (y) aumenta ao adicionar um ponto na variável independente (x). Logo, observou-se que o MOE aumentou consideravelmente a partir do 12º. anel cambial.

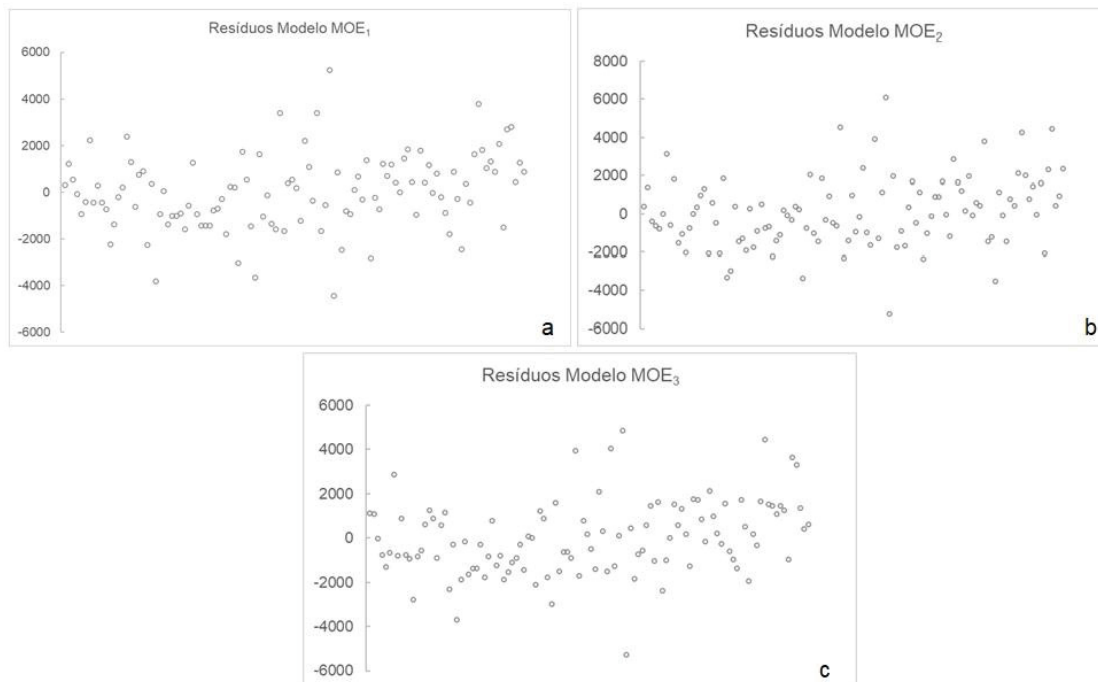
A propriedade pode aumentar nessa idade, primeiramente, devido à natureza do lenho juvenil durante a formação da madeira. Moore, Lyon e Lehneke (2012) observaram o mesmo aumento da propriedade no sentido radial e justificaram que a partir de 12 anéis, o lenho já não é considerado juvenil. Portanto, a madeira dessa zona tem um aumento das propriedades até a sua estabilização (ZOBEL; SPRAGUE, 1998; LARSON *et al.*, 2001).

Em segundo, em torno dos 12 anos normalmente ocorre o desbaste, resultando em maior crescimento do povoamento. Portanto, devido ao seu alto crescimento, a árvore começa a mudar a formação celular para suportar o seu próprio peso. Enquanto cresce em diâmetro, a árvore atinge maiores alturas para captar a luz solar para produzir mais fotossintéticos utilizados no crescimento celular. Conforme, esse maior crescimento acontece, as árvores precisam se tornar mais rígidas para suportar seu próprio peso. Assim, as células mudam suas características gradualmente (LARSON *et al.*, 2001; LASSERRE *et al.*, 2009; WATT *et al.*, 2009; SCHIMLECK *et al.*, 2018), e um dos resultados é o aumento da rigidez, como observado a partir da P₃.

Com relação aos coeficientes de determinação, verifica-se que foram um pouco menores que os coeficientes dos modelos para densidade. Embora ainda altos, isso pode indicar o MOE pode ser influenciado por outro fator, como o ângulo da microfibrila (CLARK *et al.*, 2008; VIKRAM *et al.*, 2011; DAHLEN; AUTY; EBERHARDT, 2018).

Na Figura 26 estão apresentados os resíduos para os modelos do MOE que resultaram em melhor predição dos dados. A análise de normalidade (Teste de Kolmogorov – Smirnov) dos resíduos com α 0,05, validou a hipótese nula, indicando que os resíduos apresentam distribuição normal.

Figura 26 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos de módulo de elasticidade MOE_1 , MOE_2 e MOE_3 do sortimento B (diâmetro de 350 a 450 mm).



Fonte: A autora (2023).

Como nos modelos da densidade, ao excluir o intercepto b_0 das análises de regressão não ocorreu um aumento nos resíduos. Ao comparar os resíduos entre os modelos com e sem intercepto, não se notou diferença entre os resíduos. Indicando que tanto os modelos com intercepto quanto o sem intercepto tendem a estimar os valores iguais ou muito próximos. A análise de resíduos indicou que metade dos valores teve resíduos variando de -1.000 a 1.000 e que apenas 17% apresentaram valores menores e maiores do que -2.000 e 2.000, respectivamente. Mesmo com uma quantidade considerável de pontos com resíduos altos, os modelos apresentam bom prognóstico e podem ter melhorias da predição ao utilizar mais variáveis dependentes relacionadas ao MOE.

Na Tabela 28 estão apresentados os melhores modelos com a melhor predição dos dados para o Sortimento C. Entre os modelos gerais executados com e sem o intercepto b_0 , ajustaram-se melhor os modelos sem o intercepto b_0 . Diferentemente dos sortimentos analisados anteriormente, o Sortimento C não apresentou tábuas $P_{1,234}$, $P_{1,2345}$, $P_{2,345}$, $P_{3,45}$ e $P_{4,5}$, portanto esses conjuntos não constam nos modelos. Essas posições não estavam presentes

devido ao pequeno diâmetro da tora. Pelo menor diâmetro, a tora não apresentou anéis cambiais de $P_{,5}$. Adicionalmente, no momento do desdobro, as tábuas com presença de $P_{,4}$ foram cortadas das zonas externas das toras, adjacente as costaneiras. Este corte resulta em tábuas extraídas da parte central da tora, cujas posições possuem grande concentração das $P_{,1}$ e $P_{,2}$ ou tábuas com posições $P_{,4}$ e $P_{,3}$.

Tabela 28 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente densidade (ρ) em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento C (diâmetro de 250 a 350 mm).

Modelos	R^2 / R^2_{adj}
Presença da Posição	
$(\rho_1) \rho = 487,0(P_{,12}) + 544,1(P_{,123}) + 524,0(P_{,23}) + 572,6(P_{,234}) + 487,3(P_{,34})^{***}$	0,99/0,96
%	
$(\rho_2) \rho = 4,9(P_{,12}) - 2,6(P_{,123}) + 5,2(P_{,23}) - 2,1(P_{,234}) + 4,4(P_{,34})^{***}$	0,99/0,96
% Posições individuais	
$(\rho_3) \rho = 5,0(P_{,1}) + 5,9(P_{,2}) + 6,1(P_{,3}) + 3,1(P_{,4})^{***}$	0,99/0,96

* coeficientes com p -valor $<0,05$; ** coeficientes com p -valor $<0,01$; ***coeficientes com p -valor $<0,0001$; * coeficientes com p -valor $<0,05$; ** coeficientes com p -valor $<0,01$; ***coeficientes com p -valor $<0,0001$; R^2 – coeficiente de determinação; R^2_{aj} . – coeficiente de determinação ajustado; ρ – densidade aparente a 12%; $P_{,12}$ – posição com zero a 12 anéis cambiais; $P_{,123}$ – posição com zero a 18; $P_{,23}$ – posição com 12 a 18; $P_{,234}$ – posição com 12 a 24; $P_{,34}$ – posição com 18 a 24; $P_{,1}$ – posição com zero a seis; $P_{,2}$ – posição com seis a 12; $P_{,3}$ – posição com 12 a 18; $P_{,4}$ – posição com 18 a 24 anéis cambiais.

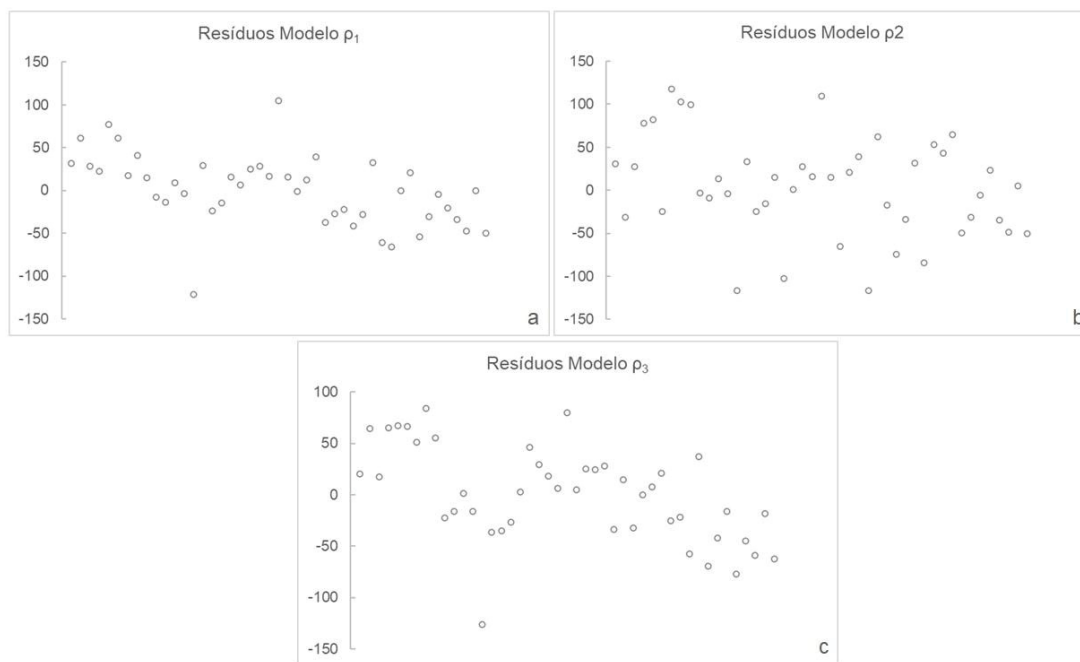
Fonte: A autora (2023).

Para prever a densidade pela presença/ausência da posição, o modelo 1 e o 2 tiveram todas as variáveis significativas. Não se observou uma tendência de aumento da densidade no sentido radial neste sortimento. Contudo, como eram toras mais altas em relação à base e apresentavam menor número de anéis cambiais, isso pode estar atrelado à própria formação da madeira. Mesmo que a densidade aumente no sentido radial (LARSON *et al.*, 2001; TRIANOSKI *et al.*, 2013; HEIN; SILVA; BRANCHERIAU, 2013; MELO, 2015; PALERMO *et al.*, 2013; WESSELS *et al.*, 2015), devido à baixa amostragem do Sortimento C, não foi possível captar esse padrão nos modelos.

A baixa amostragem pode ter impactado também o modelo p_3 , já que a posição $P_{,4}$ não apresentou coeficientes angulares superiores à posição $P_{,3}$. Devido à baixa quantidade da $P_{,4}$ observada nas tábuas, a densidade desse lenho pode não ter sido completamente representada.

Na Figura 27 estão apresentados os resíduos para os modelos da densidade que resultaram em melhor predição dos dados. A análise de normalidade (Teste de Kolmogorov – Smirnov) dos resíduos com α 0,05, validou a hipótese nula, indicando que os resíduos apresentam distribuição normal. Ao excluir o intercepto b_0 das análises de regressão linear múltipla dos modelos p_1 e p_3 não foi constatado um aumento no valor dos resíduos entre os modelos com e sem o intercepto (Figura 27b).

Figura 27- Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos da densidade p_1 , p_2 e p_3 do sortimento C (diâmetro de 250 a 350 mm).



Fonte: A autora (2023).

Os resíduos do p_2 foram um pouco superiores aos dos outros modelos. Da mesma forma que nos sortimentos anteriores, isso pode indicar a maior sensibilidade do modelo, devido à forma que foi modelado. Contudo, o modelo com o intercepto b_0 não apresentou nenhuma variável independente significativa no nível de significância α 0,05.

De forma geral, em nenhum dos modelos se constatou a tendência de super ou subestimar os resultados, indicando um bom ajuste do modelo.

Os modelos ajustados para o MOE estão na Tabela 29, em que são apresentados os melhores modelos em função do coeficiente de determinação, nível de significância da ANOVA, valores p dos coeficientes e análise dos resíduos. Em ambos os modelos com variáveis qualitativas e quantitativas, ajustaram-se melhor os modelos sem o intercepto b_0 .

Tabela 29 - Modelos de regressão múltipla linear para variável dependente MOE em função da presença e área em percentual de diferentes lenhos contidos em tábuas do sortimento C (diâmetro de 250 a 350 mm).

Modelos	R^2 / R^2_{adj}
Presença da Posição	
(MOE ₁) $MOE = 5.375(P_{,12}) + 5.955(P_{,123}) + 5.797(P_{,23}) + 7.731(P_{,234}) + 6.028(P_{,34})^{***}$	0,90/0,87
%	
(MOE ₂) $MOE = 53,7(P_{,12}) - 31,8(P_{,123}) + 56,8(P_{,23}) + 61,4(P_{,34})^{***}$	0,91/0,87
% Posições individuais	
(MOE ₃) $MOE = 59,6(P_{,1}) + 47,6(P_{,2}) + 87,2(P_{,3}) + 40,3(P_{,4})^{***}$	0,90/0,87

* coeficientes com p-valor<0,05; ** coeficientes com p-valor<0,01; ***coeficientes com p-valor<0,0001; R^2 – coeficiente de determinação; R^2_{aj} – coeficiente de determinação ajustado; MOE – módulo de elasticidade; $P_{,12}$ – posição com zero a 12 anéis cambiais; $P_{,123}$ – posição com zero a 18; $P_{,23}$ – posição com 12 a 18; $P_{,234}$ – posição com 12 a 24; $P_{,34}$ – posição com 18 a 24; $P_{,1}$ – posição com zero a seis; $P_{,2}$ – posição com seis a 12; $P_{,3}$ – posição com 12 a 18; $P_{,4}$ – posição com 18 a 24 anéis cambiais.

Fonte: A autora (2023).

No sortimento C, observou-se uma maior variação do MOE no sentido radial. No modelo MOE₁ as tábuas com a presença de lenhos $P_{,234}$ tiveram maiores MOE que as tábuas com lenhos exclusivamente $P_{,34}$.

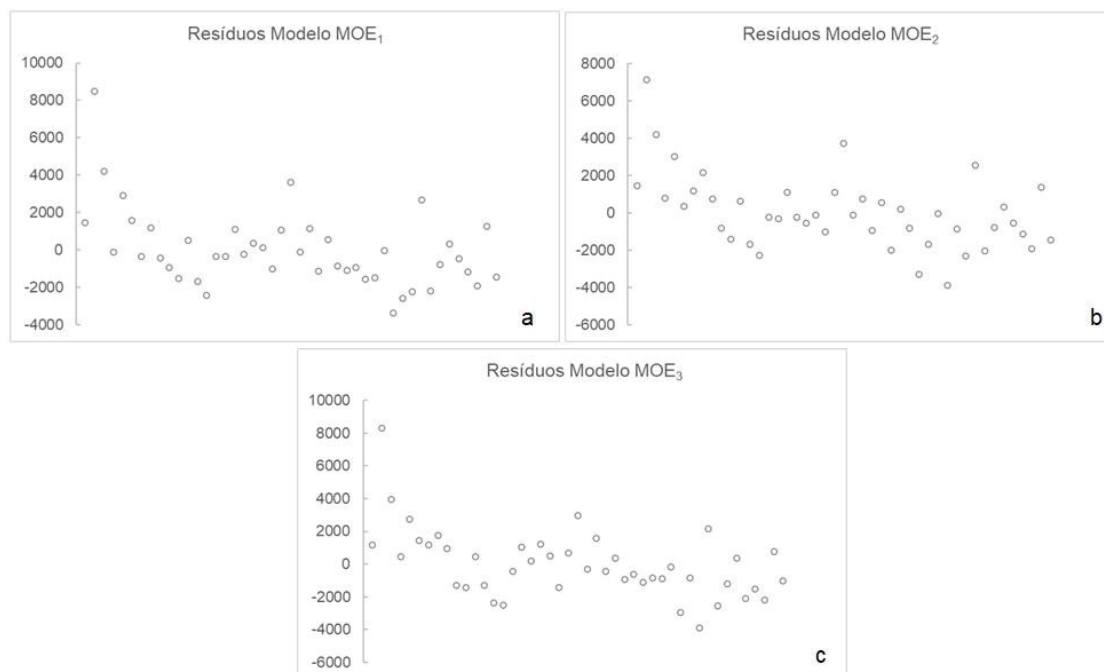
As variações do MOE ainda podem ter sido influenciadas por defeitos como nós. Como as toras desse sortimento tinham menor diâmetro, por consequência ocorre maior quantidade de nós presentes nas tábuas. Já que mesmo em povoamento com excelentes práticas de manejo, após as desramas os nós ficam contidos no núcleo da tora. O efeito desse defeito natural nas

propriedades mecânicas, depende da proporção de madeira ocupada pelos nós (KRETSCHMANN, 2010; HOSSEIN; SHAHVERDI; ROOHNIA, 2011). Uma abundância de nós foi observada nesse sortimento, sendo que na classificação visual não foi observada nenhuma tábua completamente livre de nós (limpa).

No modelo MOE_3 observou-se uma grande diferença no coeficiente angular entre as $P_{2,2}$ e $P_{3,3}$. O mesmo comportamento foi evidenciado em todos os sortimentos estudados. A hipótese, como já mencionado previamente, é que este aumento esteja relacionado ao desbaste realizados em torno dos 12 anos e seu conseqüentemente maior crescimento. Resultando em maior quantidade de fotossintéticos produzidos, portanto, um maior espessamento das paredes celulares e maiores propriedades mecânicas.

Na Figura 28 estão apresentados os resíduos para os modelos do MOE que resultaram em melhor predição dos dados. A análise de normalidade (Teste de Kolmogorov – Smirnov) dos resíduos com $\alpha 0,05$, validou a hipótese nula, indicando que os resíduos apresentam distribuição normal.

Figura 28 - Gráficos dos resíduos da regressão linear dos modelos de módulo de elasticidade MOE_1 , MOE_2 , e MOE_3 , do sortimento C (diâmetro de 250 a 350 mm).



Fonte: A autora (2023).

Como nos modelos anteriores, não houve aumento nos resíduos ao modelar sem o intercepto. Ao comparar os resíduos entre os modelos com e sem intercepto, não se notou diferença entre os resíduos. Embora, com apenas 46 observações, a análise de resíduos indicou que boa parte dos resultados teve valores ao redor de zero. Ainda que os resíduos sejam considerados altos, os modelos apresentam bom prognóstico e podem ter melhorias da predição ao utilizar mais variáveis dependentes relacionadas ao MOE.

4.7 INFLUÊNCIA DO DESDOBRO NA QUALIDADE

4.7.1 Quantidade de tábuas com lenho juvenil e lenho adulto provenientes de dois desdobros

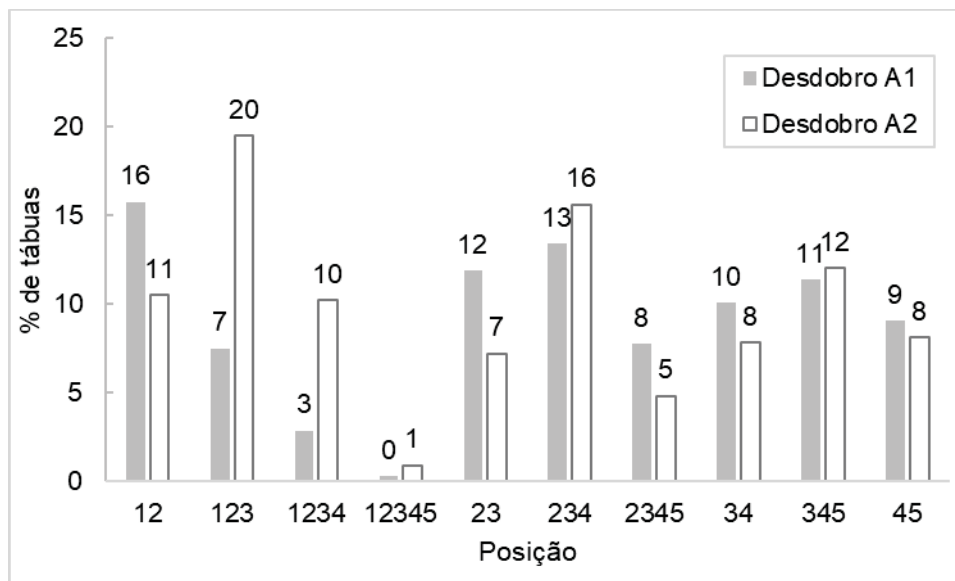
Ao analisar a área transversal das tábuas pelo método de análise digital de imagem foi possível comparar eventuais diferenças entre os dois desdobros realizados no Sortimento A. Um teste de proporções z foi executado com nível de significância α 0,05 para averiguar possíveis diferenças entre os dois desdobros em cada conjunto de posições. Na Figura 29, estão ilustrados os percentuais de tábuas resultantes em dois desdobros para diferentes conjuntos de posições.

Pelo teste de proporções z foram averiguadas diferenças estatísticas significativas entre os valores percentuais de tábuas obtidas nos desdobros para os conjuntos: P_{12} , P_{123} , P_{1234} , P_{23} , e P_{45} , com p-valores de 0,0387, 0,0000, 0,0000, 0,0346 e 0,0000, respectivamente. Para os valores dos conjuntos P_{12345} , P_{234} , P_{2345} , P_{34} e P_{345} não foram constatadas diferenças significativas, com p-valores de 0,2475, 0,4070, 0,1069, 0,2893 e 0,7889 respectivamente, todos superiores a 0,05.

No desdobro A-1, parte das tábuas serradas tinham apenas lenho juvenil (P_{12}) e parte apenas lenho adulto (P_{45}), resultando em uma maior segregação do material. Adicionalmente, embora os percentuais das posições P_{34} e P_{345} não tenham sido estatisticamente significativos, o desdobro A-1 apresentou maior percentual do que o A-2. Ao considerar as tábuas serradas exclusivamente com a presença de lenho de transição e lenho adulto (P_{34} ,

P_{,345}, P_{,45}) o desdobro A-2 apresentou cerca de 12% mais material do que o A-1. Esse indicador pode ser um fator importante em uma análise econômica baseada na qualidade das tábuas para o uso em produtos que requerem alta qualidade e desempenho do material.

Figura 29 – Quantidade de tábuas de *Pinus taeda* com diferentes posições radiais obtidas de dois desdobros de toras de diâmetro entre 430 e 550 mm.



Posição 12 – Variando de zero a 12 anéis cambiais; Posição 123 – zero a 18; Posição 1234 – zero a 24; Posição 12345 – zero a 30; Posição 23 – 12 a 18; Posição 234 – 12 a 24; Posição 2345 – 12 a 30; Posição 34 – 18 a 24; Posição 345 – 18 a 30; Posição 45 – 24 a 30 anéis cambiais.

Fonte: A autora (2023).

Pelo diagrama de corte do desdobro A-2, observaram-se tábuas com maior variação das posições. Verificou-se que houve um percentual maior de tábuas com a presença de lenho juvenil e lenho adulto, principalmente nas posições P_{,123} e P_{,1234}. Isto pode ser um indicativo de maior variabilidade dentro de uma mesma tábua, ou seja, uma única tábua foi composta por lenho juvenil e lenho adulto simultaneamente. Considerando que o lenho juvenil apresenta menores propriedades mecânicas do que o lenho adulto, a maior variabilidade de posições dentro de uma tábua pode, por exemplo, fazer com que ocorra uma diminuição das propriedades mecânicas e diminuição da estabilidade dimensional.

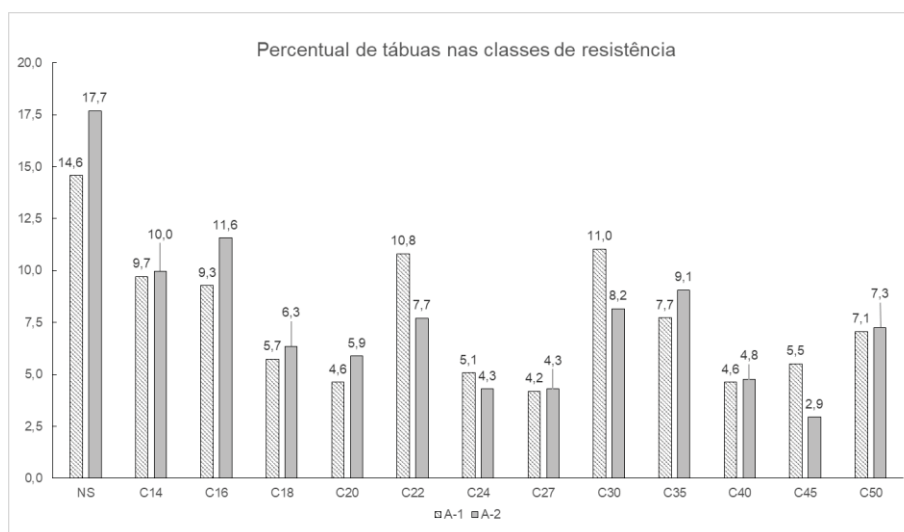
4.7.2 Classificação das tábuas nas normas brasileira e europeia

Nesta etapa, os dois desdobros realizados no sortimento A foram classificados pela norma europeia EN 338 (EN, 2016a). Para tal, foram determinadas as classes em cada grupo com base no MOE das normativas. Ambos A-1 e A-2 foram categorizados como C24 para o MOE.

O teste T (Student) realizado entre os MOE dos grupos A-1 (n=453) e A-2 (n=441) indicou que a hipótese de nulidade foi aceita (p-valor 0,6349) portanto, não houve diferença estatística entre os dois grupos.

A distribuição das tábuas em cada desdobro, A-1 e A-2, agrupadas dentro de cada classe de resistência pela EN 338 (EN, 2016) foi avaliada qualitativamente e pode ser observada na Figura 30. Ambos os desdobros realizados em toras de grandes diâmetros (430 - 550 mm) tiveram uma boa representatividade de tábuas classificadas, abrangendo todas as classes de resistência estipuladas pela norma. O desdobro A-2 apresentou 3 classes (C16, C20 e C35) com percentual maior que 1% em relação ao desdobro A-1, contudo, teve aproximadamente 3% maior quantidade de tábuas classificadas como não estruturais (NS). O desdobro A-1 teve 3 classes (C22, C30 e C45) com percentual de aproximadamente 3% maior que o desdobro A-2 e menor quantidade de tábuas classificadas como NS.

Figura 30 - Quantidade de tábuas de *Pinus taeda* classificadas pelo MOE na EN 338 (EN, 2016) provenientes de dois diagramas de desdobros.



Fonte: A autora (2023).

De forma geral, pode-se dizer que os dois desdobros apresentaram resultados satisfatórios ao prover tábuas classificadas como uso estrutural e ambos permitiram o corte de tábuas provenientes das partes mais externas da tora e limitaram a parte interna ao máximo possível. Com a Figura 30, também foi possível observar que o desdobro A-1 acabou tendo maior quantidade de tábuas classificadas em classes de resistência mais altas, do que o desdobro 2. Embora a diferença seja de aproximadamente 3%, isso pode ser explicado pelo fato de o desdobro A-1 tangenciou os anéis mais velhos, promovendo tábuas cujas áreas transversais apresentam maior quantidade de lenho adulto, enquanto sua parte central apresentou menor área de corte. Já no desdobro A-2 o corte priorizou a maior quantidade de madeira na parte central. Embora tenha tábuas provenientes da parte mais externa, após o corte, essa parte apresenta menor área, devido à perda com costaneiras, etc. Isso resultou em menor quantidade de tábuas classificadas nas maiores classes. Essa ocorrência foi corroborada com os resultados da análise de imagem dos lenhos na área transversal das tábuas, já que pela análise de imagem foi constatado que houve maior quantidade de tábuas formadas por lenho adulto ou lenho adulto com lenho de transição.

Ao comparar classes de resistência nos desdobros A-1 e A-2 pelo teste z pela média percentual, não foi constatado diferenças entre nenhuma das classes. Todos os p-valores nas classes foram maiores que o nível de significância, aceitando-se a hipótese de nulidade de que as médias são iguais (Tabela 30).

Tabela 30 - Valores do teste z para o número de tábuas dos desdobros A-1 e A-2 classificadas pela norma europeia EN 338 (EN, 2016).

Classe	NS	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
n_(A-1)	66	44	42	26	21	49	23	19	50	35	21	25	32
n_(A-2)	78	44	51	28	26	34	19	19	36	40	21	13	32
z	-1,268	-0,133	1,414	-0,383	-0,844	1,600	0,543	-0,085	1,457	-0,725	-0,089	1,905	-0,111
p-valor	0,2048	0,8945	0,1572	0,7020	0,3987	0,1095	0,5870	0,9326	0,1461	0,4686	0,9289	0,0568	0,9112

Fonte: A autora (2023).

Os dois desdobros realizados no sortimento A foram classificados pela norma brasileira NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b). As tábuas foram agrupadas nas classes com base nos valores do MOE. Ambos os desdobros A-1 e A-2 foram categorizados na Classe 2. As médias percentuais das classes de resistência entre os desdobros A-1 e A-2 foram comparadas pelo teste z. Diferenças entre as classes não foram constatadas, pois os p-valores foram maiores que o nível de significância, aceitando-se a hipótese de nulidade de que as médias são iguais (Tabela 31).

Tabela 31 - Valores do teste z para o número de tábuas dos desdobros A-1 e A-2 classificadas pela norma brasileira NBR 7190:2 (ABNT, 2022b).

		MOE (MPa)			
Sortimento		Classe 1	Classe 2	Classe 3	NS
A-1	n	205	138	105	5
A-2	n	180	139	112	10
z		1,3396	-0,3413	-0,7734	-1,3545
p-valor		0,1804	0,7329	0,4393	0,1756

Fonte: A autora (2023).

A igualdade entre as classes pode ser explicada pelo menor valor do MOE requerido para uma tábua ser considerada estrutural pela norma. Dessa forma, ambos os desdobros apresentaram estatisticamente a mesma quantidade de tábuas.

4.8 ENSAIOS DESTRUTIVOS COM CORPOS DE PROVA SEM DEFEITOS

4.8.1 Densidade aparente

Na Tabela 32 estão apresentados os resultados médios para a densidade aparente com base no teor de umidade de 12,4% para corpos de prova livres de defeitos em diferentes posições radiais utilizados nos testes de flexão destrutivos. Houve um aumento significativo da densidade ao se afastar da medula em direção a periferia do tronco. Em valores médios, a densidade aumentou consideravelmente (11%) quando comparado os primeiros seis anéis de crescimento ($P_{,1}$) com anéis entre 6,1 e 12 anéis de crescimento ($P_{,2}$).

A partir do 18.º anel de crescimento (P₄) a densidade tende se manter mais constante, com aumentos de no máximo 5% a partir do 24.º anel de crescimento (P₅).

Tabela 32 - Valores médios da densidade aparente obtidos de corpos de prova sem defeitos em cinco posições radiais.

Lenho	P₁ 0-6	P₂ 6,1-12	P₃ 12,1-18	P₄ 18,1-24	P₅ 24,1-30
Média (g.cm⁻³)	0,48 c	0,54 b	0,58 ab	0,59 a	0,62 a
S	0,07	0,04	0,03	0,04	0,06
CV (%)	14,56	6,69	5,46	7,16	10,30
n	27	22	24	43	10
Diferença em relação ao lenho anterior %		> 11%	> 7%	> 2%	> 5%

Fonte: A autora (2023).

Diferenças estatísticas entre as médias foram constatadas pelo teste de médias Tukey (α 0,05). Um aumento radial da propriedade ocorre ao afastar-se da medula em direção à casca. Os lenhos adultos P₄ e P₅ foram estatisticamente superiores aos lenhos juvenis P₁ e P₂. Também se ressalta que o lenho P₃, considerado transição, foi estatisticamente igual ao P₄ ao P₂.

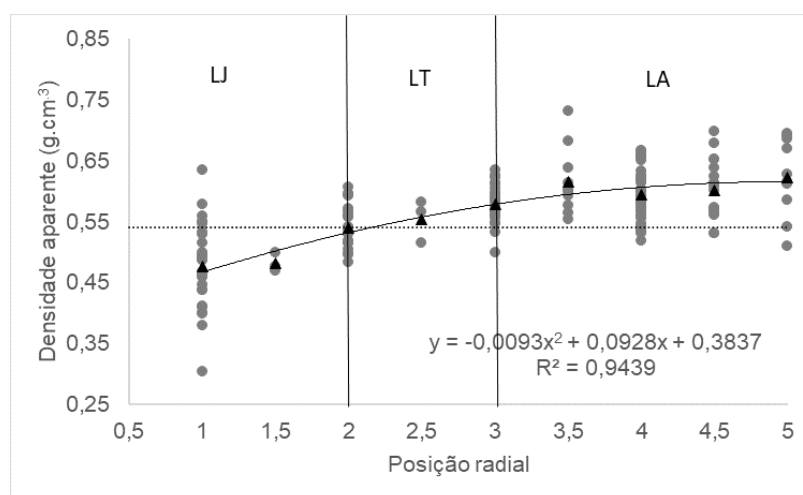
Ademais, a densidade média pode ser considerada condizente com outros estudos com *Pinus taeda*, como Ballarin e Palma (2003), Trianoski *et al.* (2013), Melo (2015). A maior ou menor variação entre os estudos deve-se à pequena diferença de idade das árvores usadas em cada avaliação, bem como ao sítio de crescimento. Sendo que em madeiras de 37 anos provenientes do Estado de São Paulo, Ballarin e Palma (2003) obtiveram densidade aparente média para madeira adulta de 0,586 e 0,439 g.cm⁻³ para a madeira juvenil. Trianoski *et al.* (2013), avaliaram a madeira com 17 e 18 anos, considerada madeira juvenil e de transição, provenientes dos Estados de São Paulo e Paraná, cuja densidade média foi de 0,485 g.cm⁻³. Já Melo (2015), avaliou madeiras com idade de oito, 14, 18 e 26 anos, provenientes do Estado de Santa

Catarina e resultou em densidades básicas médias de 0,332, 0,393, 0,397 e 0,447 g.cm⁻³, respectivamente.

Com os resultados apresentados para o método limiar, pode-se notar que a partir da posição P₃ (18 a 24 anéis) o aumento da densidade tende a ser menor do que nas idades iniciais de crescimento, chegando quase a estabilizar. Esse incremento na densidade também foi observado por Larson *et al.* (2001).

A zona de lenho juvenil foi determinada pelo método limiar proposto por Clark, Daniels e Jordan (2006) e utilizando como limite, a densidade média do lenho juvenil (0,55 g.cm⁻³) obtida por Ballarin e Palma (2003) ao segregar o *Pinus taeda* pelo comprimento dos traqueoides e pode ser observada na Figura 31.

Figura 31 - Determinação do ponto limite do lenho juvenil pela densidade aparente.



Fonte: A autora (2023).

Nota-se que o lenho juvenil se estende até o 12.º anel de crescimento (P₂), já que a partir desse ponto, a maioria dos dados apresentam densidade igual ou superior à 0,55 g.cm⁻³. Com base neste resultado e comparando com o resultado obtido por Ballarin e Palma (2003), que concluíram que o lenho juvenil se estende ao 14.º anel de crescimento, pode-se afirmar que no caso do *Pinus taeda* de rápido crescimento brasileiro, o lenho juvenil é formado até o 12 - 14.º ano. Isto é corroborado por Zobel e Sprague (1998), que afirmaram que pode ocorrer uma variação de um a dois anéis de crescimento para delimitar a zona de lenho juvenil dentro de uma mesma espécie.

Contudo, ao utilizar o valor de $0,35 \text{ g.cm}^{-3}$ proposto pela norma brasileira NBR 7190 - 2 (ABNT, 2022b), a zona de formação do lenho é compreendida por madeira da P₁ (seis primeiros anéis). Ao considerar a densidade de $0,6 \text{ g.cm}^{-3}$ (Classe 1), observa-se um deslocamento até 18 anos. Pela norma europeia EN 338 (EN, 2016a), o limite considerado seria de $0,29 \text{ g.cm}^{-3}$. Como a madeira deste estudo teve valores maiores do que o proposto pela EN 338 para uma madeira ser considerada madeira estrutural, não é possível usar o valor mínimo da norma como limite nesse método. Ressalta-se, no entanto, que para uma madeira ser considerada apta para uso estrutural, se requer a avaliação de outras propriedades além da densidade.

Isto pode indicar que utilizar apenas a densidade para determinar a qualidade da madeira para fins estruturais pode não ser suficiente. Observa-se que em corpos de prova livres de defeitos, apenas a densidade não foi suficiente para determinar a zona de lenho juvenil. Já que ao aumentar a densidade não necessariamente se aumenta o MOE na mesma proporção, visto que a correlação do MOE com a densidade é considerada baixa em alguns estudos. Isso ressalta a importância do MOE para definir a qualidade da madeira e por ser uma propriedade limitante para determinar a zona de lenho juvenil (AQUAH *et al.*, 2018; MOORE; LYON; LEHNEKE, 2012).

4.8.2 Módulo de elasticidade e resistência à flexão

No teste de Grubbs, nenhum valor do módulo de elasticidade foi considerado *outlier* nos grupos de posições/lenho. Já para a propriedade de módulo de ruptura à flexão, um corpo de prova para cada um dos grupos das posições P₂, P₃, P₄ e P₅ foi considerado *outlier*. Esses corpos de prova foram excluídos dos dados e, então, foram realizados os cálculos de estatística descritiva, teste de normalidade e teste de médias (Tukey). O teste de normalidade indicou que após a exclusão dos *outliers*, os valores do MOE apresentaram distribuição normal (p-valor 0,3044). Contudo, os valores do MOR não apresentaram normalidade (p-valor 0,0139) e após a transformação dos valores por Box-Cox, os valores apresentaram-se normais (p-valor 0,2487).

Na Tabela 33 estão apresentados os resultados da estatística descritiva e teste de médias de Tukey nas cinco diferentes cores de lenho para

as propriedades mecânicas do MOE e MOR à flexão. Os resultados da ANOVA para o teste de Tukey estão no Apêndice 4.

Tabela 33 - Valores médios do MOE e MOR à flexão provenientes de ensaios destrutivos de corpos de prova sem defeitos de *Pinus taeda* para cinco posições radiais.

Posição/ lenho		P _{,1}	P _{,2}	P _{,3}	P _{,4}	P _{,5}
MOE (MPa)	Média	5.277 c	7.315 b	7.933 b	8.260 b	9.617 a
	c.v.(%) ¹	19,61	21,48	21,21	14,77	13,74
	n ²	14	23	27	27	13
Resistência a flexão (MPa)	Média	52,69 c	68,11 b	79,62 a	78,54 a	84,88 a
	c.v.(%)	18,47	16,00	11,83	13,02	11,08
	N	14	22	26	26	12
	f _k	38,81	51,32	61,39	59,03	58,31

¹ Coeficiente de variação em porcentagem; ² Número de repetições. Letras minúsculas diferem entre si na linha pelo teste de Tukey com nível de significância de 5%.

Fonte: A autora (2023).

Observou-se uma tendência de aumento em ambas as propriedades conforme a idade cambial da árvore aumentou. A P_{,1} cuja idade varia de 0,1 a seis anos, apresentou as menores médias e diferiu estatisticamente de todos os outros lenhos. Isso corrobora com os resultados obtidos no teste de flexão não destrutivo, em que tábuas com presença de lenho P_{,1} não alcançaram os valores mínimos exigidos pela norma europeia, mas se classificaram como Classe 3 pela norma brasileira. No entanto, como para os painéis estruturais é indicado valores superiores a 7.000 MPa, a P_{,1} pode não ser indicada a estar presente em tábuas de madeira de *Pinus taeda* visando o uso para compor elementos estruturais. A P_{,5} (24,1 a 30 anéis) apresentou as maiores médias em ambas as propriedades e estatisticamente foi superior aos demais. O indicado seria utilizar tábuas com a presença exclusivamente deste lenho. No entanto, devido à cultura de rotações curtas, tábuas com a presença apenas desse lenho tornam-se difíceis de se obter. O ideal seria aumentar a rotação das plantações, para que mais lenho adulto fosse formado, tendo assim, área suficiente para realizar o desdobro e obter tábuas mais homogêneas. Considerando que essa solução depende da indústria primária (empresas de

reflorestamento), há a necessidade de se utilizar tábuas com mesclas dos lenhos P₅, P₄ e P₃. Para tal, poderia se utilizar métodos de desdobro que beneficiassem tábuas tangenciais aos anéis, obtendo-se mais material com apenas lenhos adultos.

Verificou-se ainda que a P₂ (6,1-12 anos), P₃ (12,1 a 18) e P₄ (18,1 a 24) tiveram médias estatisticamente iguais. Esse fato pode auxiliar o processo de tomada de decisão do desdobro, visto que esses lenhos (P₃ a P₄) por apresentarem médias maiores que o requisitado por normas internacionais, poderiam estar presentes em tábuas para o uso estrutural.

Portanto, a informação do custo desse material deverá ser avaliada, visto que está altamente atrelado ao rendimento. Um dos resultados pode ser o aumento do valor de venda para tábuas com maiores propriedades mecânicas, gerando consequentemente um aumento do custo dos painéis MLCC. Em um estudo realizado por Terezo *et al.* (2020), os autores constataram um preço médio de R\$ 74,00 m⁻², no entanto, esse valor poderá subir significativamente quando as empresas de base classificarem e venderem tábuas destinadas ao uso estrutural. Contudo, as propriedades desse material seriam consideravelmente maiores, e os painéis teriam os requisitos mínimos solicitados por normas internacionais, possibilitando a entrada do país no mercado externo.

4.8.3 Interação entre grã e posições

A interação entre as posições e a grã na área transversal não foi significativa ao nível de 5% de significância para o módulo de elasticidade ou para o módulo de ruptura. Na Tabela 34, estão apresentados os resultados da ANOVA no teste de interação entre os fatores posição e grã para o módulo de elasticidade à flexão destrutiva a quatro pontos e para o módulo de ruptura.

Desde modo, o teste de médias foi executado para verificar se existem diferenças do MOE e do MOR em corpos de prova com diferentes inclinações da grã em relação à força aplicada. Na Tabela 35 estão apresentadas as médias do MOE e MOR em relação à grã com os respectivos resultados do teste de médias de Tukey. No Apêndice 4 encontra-se a tabela com os resultados da ANOVA.

Tabela 34 – ANOVA do teste fatorial para avaliação entre os fatores posição e grã no MOE e no MOR.

Posição x grã = MOE					
ANOVA	G.L.¹	SQ²	QM³	Estatística F	P-valor
Posição	4	140217309,0	35054327,3	18,501	0,0000*
Grã	6	26560315,7	4426719,3	2,336	0,0395*
Posição. Grã	14	20635302,4	1473950,2	0,778	0,6872 ^{ns}
Resíduo	80	151577411,6	1894717,7		

Posição x Grã = MOR					
ANOVA	G.L.	SQ	QM	Estatística F	P-valor
Posição	4	6223,30	1555,82	9,5427	0,0000*
Grã	6	3301,33	550,22	3,3748	0,0051 ^{ns}
Posição. Grã	14	2853,69	203,84	1,2502	0,2574 ^{ns}
Resíduo	80	13043,03	163,04		

*significativo ao nível de significância de 5%. ^{ns} não significativo ao nível de significância de 5%.

Fonte: A autora (2023).

Tabela 35 - Médias do MOE em relação a inclinação dos anéis.

Grã	MOE (MPa)	MOR (MPa)
0	6538,14 b	59,96 b
15	6679,51 ab	63,5 ab
30	7944,84 ab	70,16 ab
45	7163,55 ab	68,21 ab
60	7936,09 ab	71,23 ab
75	8827,10 a	80,01 a
90	7910,56 ab	73,61 ab

Letras diferem entre si na coluna ao nível de 5% de significância pelo teste de médias Tukey.

Fonte: A autora (2023).

Os resultados do teste de Tukey indicaram diferenças estatísticas entre as médias para o ângulo de 0 e 75.°. Ao contrário dos resultados de Carrasco e Mantilla (2016) que obtiveram uma tendência na resistência ao cisalhamento ou Carrasco *et al.* (2017), que observaram uma diminuição do módulo de

elasticidade com o aumento da inclinação, neste estudo não se observou uma tendência de aumento ou diminuição do MOE e/ou MOR conforme se aumentava o ângulo.

Em um estudo avaliando o MOR e o MOE em cinco espécies diferentes, os autores constataram uma redução de aproximadamente 60% da resistência com o aumento da inclinação do ângulo em 15.° (MANIA; SIUDA; ROSZYK, 2020). Neste estudo, o MOR médio observado no ângulo de 0.° foi aproximadamente 25% menor que no ângulo de 75.°. Já entre os ângulos de 0 e 15.° essa diferença foi de aproximadamente 6%, indicando que o ângulo não apresenta influência nas propriedades MOE e MOR no teste de flexão destrutivo em amostras livres de defeitos.

Contudo, deve-se considerar a quantidade de corpos de prova utilizados nessa análise. A igualdade estatística dos resultados no MOE e MOR nos diferentes ângulos no teste de flexão pode ser devido à pequena quantidade de corpos de prova (BUTLER *et al.*, 2016). Os autores avaliaram a madeira de *Pinus taeda* com idades variando de 24 a 33 anos e utilizaram corpos de prova livres de defeitos para avaliar no ensaio de flexão. No total foram estudados 743 corpos de prova e os autores obtiveram diferenças de significativas entre o MOE nos ângulos radiais (0 e 15.°) e ângulos tangenciais (75 e 90.°), sendo que corpos de prova com maiores ângulos apresentaram maiores MOE e MOR. Os ângulos tangenciais foram aproximadamente 8% e 9% menores para o MOE e MOR, respectivamente. No entanto, essas afirmações são válidas apenas para corpos de prova livres de defeitos, ao avaliar tábuas de tamanho real esse comportamento não foi observado pelos autores.

5 CONCLUSÕES DA QUALIDADE DA MADEIRA

Com os resultados obtidos na primeira parte deste estudo foi possível concluir que:

A análise da área transversal por imagem facilitou a obtenção das informações de crescimento relativas à tora, como o raio e a proporção dos lenhos juvenil e adulto.

Nas tábuas, a análise por imagem permitiu rápida avaliação da área transversal de um grande volume de tábuas, facilitando a contabilização dos diferentes lenhos presentes em cada peça.

Nos três sortimentos estudados, não se observou influência do diâmetro na classificação da madeira pela densidade.

O diâmetro influenciou na classificação da madeira realizada pelo MOE e por nós.

Notou-se que em toras de maior diâmetro houve maior quantidade de tábuas com MOE mínimos para uso estrutural, e menor diâmetro dos nós ou a ausência deles.

Em toras com menor diâmetro, a quantidade de tábuas com valores altos de MOE diminuiu e o número e tamanho dos nós aumentou.

A quantidade percentual de lenho juvenil e adulto presente nas tábuas teve influência na quantidade de material classificado para o uso estrutural.

Os lenhos juvenis menores que seis anos não alcançaram os valores mínimos de MOE requeridos por normativas, sendo não indicados em tábuas destinadas ao uso estrutural.

Os lenhos adultos acima de 18 anos apresentaram melhor qualidade da madeira, e foram mais adequados para a finalidade estrutural.

Os dois métodos de desdobro empregados não influenciaram na quantidade de tábuas classificadas nas classes de resistência nas normas brasileira e europeia. A análise do rendimento médio indicou que quanto maior o diâmetro das toras maiores são os rendimentos.

O módulo de elasticidade foi a propriedade mais eficiente para classificar as tábuas de *Pinus taeda* nos requisitos para madeira estrutural estipulados pelas normas europeia e brasileira. Dentre estas, a norma europeia foi a mais restritiva para a classificação.

A segregação do lenho em cinco partes, a cada seis anéis cambiais, resultou em uma quantidade grande de informações sobre as diferentes secções na tora.

Observou-se a influência e relação dos lenhos juvenil e adulto com as propriedades de densidade, módulo de elasticidade e módulo de resistência. O método facilitou o estudo da relação de diferentes lenhos e quantidades destes presentes em uma tábua, com as suas respectivas propriedades físico-mecânicas.

Os métodos de segregação utilizados neste estudo propiciaram um passo importante no entendimento da dinâmica e interação entre os lenhos juvenil e adulto presente em uma árvore.

REFERÊNCIAS

ACERBI JUNIOR, F.W.; SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D.; MAESTRUI, R. Simulação e avaliação econômica de regimes de desbastes para *Pinus taeda* para obtenção de múltiplos produtos de madeira. *Cerne*, Lavras, v. 5, n.1, p.81-102, 1999.

ACQUAH, G.R.; ESSIEN, C.; VIA, B. K.; BILLOR, N.; ECKHARDT, L. G. Estimating the basic density and mechanical properties of elite loblolly pine families with near infrared spectroscopy. **Forest Science**, v. 64, n. 2, p. 149-158, 2018. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxx009>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASMT). **ASTM D3737**: Standard practice for establishing stresses for structural glued laminated timber (glulam). West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASMT). **ASTM D245**: Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. West Conshohocken, 2019.

ANTONY, F.; SCHIMLECK, L.R.; JORDAN, L.; CLARK, A.; DANIELS, R.F. Effect of early age woody and herbaceous competition control on wood properties of loblolly pine. **Forest Ecology and Management**, v. 262, p. 1639-1647, 2011. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.07.015

ARAUJO, D. F. P. **Avaliação de estruturas de madeira em serviço: caso de estudo da Ermida da Ascensão de Cristo**. 2015. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa (Portugal), 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas em madeira. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-1**: Projeto de estruturas em madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento. 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-2**: Projeto de estruturas em madeira. Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. 2022b.

BALLARIN, A.S.; BALLARIN, A.W.; CALIL JUNIOR, C. Classificação visual e mecânica simplificada da madeira de *Pinus* spp. In: II Congresso Latino-americano de estruturas em madeira, 2017. Buenos Aires. Anais... Buenos Aires: UNNOVA-Universidad Nacional Noroeste, 2017, p.1-11.

BALLARIN, A.W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

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

BAO, F.C., JIANG, Z.H., JIANG, X.M., LU, X.X., LUO, X.Q., ZHANG, S.Y. Differences in wood properties between juvenile and mature wood in 10 species grown in China. **Wood Sci Technology**, n. 35, p. 363–375, 2001.

BAÑO, V.; GODOY, D.; FIGUEIREDO, D.; VEGA, A. Characterization and structural performance in bending of CLT panels made from small-diameter logs of loblolly/slash pine. **Materials**, v. 11, n. 12, p. 2436, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11122436>.

BENDTSEN, B.A.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. **Wood and Fiber Science**, Monona-USA, v. 18, n. 1, p. 23-38, 1986.

BIASI, C.; ROCHA, M.P. **Rendimento em serraria de *Pinus elliottii***. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003. 12 p.

BIBLIS, E.J.; CARINO, H. F. Flexural properties of lumber from two 40-year-old loblolly pine plantations with different stand densities. **Wood and Fiber Science**, Monona-USA, v. 29, n. 4, p. 375-380, 1997.

BIBLIS, E.J.; CARINO, H. F. Flexural properties of lumber from two 50-year-old loblolly pine plantations. **Wood and Fiber Science**, Monona-USA, v. 31, n. 2, p. 200-203, 1999.

BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G.; THIEL, A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. **Eur. J.**

Wood Products, v.74, p.331-351, 2016. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia, Série Técnica (IPEF), n. 2, 1981. 25p.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. Modeling wood characteristics. In: BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forests trees and stands**. Springer, Dordrecht, 2012. p. 405-427.

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

BUTLER, M.A.; DAHLEN, J.; DANIELS, R. F.; EBERHARDT, T. L.; ANTONY, F. Bending strength and stiffness of loblolly pine lumber from intensively managed stands located on the Georgia Lower Coastal Plain. **Eur. J. Wood Products**, v. 74, p. 91-100, 2016.

CARDOSO JUNIOR, A.A. Inovação tecnológica na obtenção de madeira serrada de *Pinus* com uso de programa otimizador de desdobro. 2008. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CARREIRA, M.R.; DIAS, A.A. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do Método norte-americano às espécies de *Pinus* spp. plantadas no Brasil. **Scientia Forestalis**, n. 67, p. 78-87, 2005.

CARRASCO, E.V.M.; MANTILLA, J.N.R. Influência da inclinação das fibras da madeira na sua resistência ao cisalhamento. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 535-543, 2016.

CARRASCO, E.V.M.; SOUZA, M.F.; PEREIRA, L.R.S.; VARGAS, C.B.; MANTILLA, J.N.R. Determinação do módulo de elasticidade da madeira em função da inclinação das fibras utilizando tomógrafo acústico. **Revista Matéria**, 22 (Supl 1). 2017.

CHINIFORUSH, A.A.; VALIPOUR, H.; AKBARNEZHAD, A. Water vapour diffusivity of engineered wood: effect of temperature and moisture content. **Construction and building materials**, 224, p. 1040-1055. 2019.

CLARK, A.; BORDERS, B.E.; DANIELS, R.F. Impact of vegetation control and annual fertilization on properties of loblolly pine wood at age 12. **Forest Products Journal**, v. 54, p. 90-96. 2004.

CLARK, A.; DANIELS, R.F.; JORDAN, L. Juvenile/mature wood transition in loblolly pine as defined by annual ring specific gravity, proportion of latewood and microfibril angle. **Wood and fiber Science**, v. 38, n. 2, p. 292-299, 2006.

CLARK, A.; JORDAN, L.; SCHIMLECK, L.; DANIELS, R.F. Effect of initial planting spacing on wood properties of untinned loblolly pine at age 21. **For. Prod. J.**, n. 58, p. 78–83, 2008.

CUNHA, A.B.; MATOS, J.L.M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (“*Stress wave timer*”). **Árvore**, v.34, n.2, p.345-354, 2010.

DAHLEN, J.; AUTY, D.; EBERHARDT, T.L. Models for predicting specific gravity and ring width for loblolly pine from intensively managed plantations, and implications for wood utilization. **Forests**, v. 9, 292. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f9060292>

DARMAWAN, W.; NADIKA, D.; ROHOYU, I.; FOURNIER, M.; MARCHAL, R. Determination of juvenile and mature transition ring for fast growing sengon and jabon wood. **J. Indian Acad. Wood Sci**, v. 10, n. 1, p. 39-47. 2013. DOI: 10.1007/s13196-013-0091-x.

DAVID, H.C.; PELLICO NETTO, S.; ARCE, J.R.; CORTE A.P.J.; MARINHESKI FILHO, A.; ARAUJO, E.J.G. Efeito da qualidade do sítio e do desbaste na produção de *Pinus*. **Floresta e Ambiente**, 24 (e00096414), 2017.

DELUCIS, R.A.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D.M.; BELTRAME, R.; TREVISAN, R. Qualificação da madeira de três espécies de coníferas oriundas de reflorestamentos jovens. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 477-484, 2013.

DOBNER JUNIOR, M.; HIGA, A.R.; ROCHA, M.P. Rendimento em serraria de toras de *Pinus taeda*: sortimentos de grandes dimensões. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 385-392, 2012.

DOBNER JUNIOR, M.; HUSS, J.; TOMAZELLI FILHO, M. Wood density of loblolly pine trees affected by crown thinnings and harvest age in southern Brazil. **Wood Science and Technology**, v. 52, n. 2, p. 465-485. 2018. DOI: 10.1007/s00226-017-0983-9

DONNELLY, L.; LUNDQVIST, S. O.; O'REILLY, C. Inter and intra annual wood property variation juvenile wood between six Sitka spruce clones. **Silva Fennica**, v. 51, n. 4, p. 14, 2017.

DOWNES, G.M.; NYAKUENGAMA, J.G.; EVANS, R.; NORTHWAY, R.; BLAKEMORE, P.; DICKSON, R.L.; LAUSBERG, M. Relationship between wood density, microfibril angle and stiffness in thinned and fertilized *Pinus radiata*. **IAWA Journal**, v. 23, n. 3, p. 253-265, 2002.

ENCINAS, J.I.; SILVA, G.F.; PINTO, J.R.R. **Idade e crescimento das árvores**. Comunicações Técnicas Florestais, v. 7, n. 1, 2005. 43p.

ERASMUS, J.; KUNNEKE, A.; DREW, D.M.; WESSELS, B. The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness microfibril angle and wood density. **Forestry**, n. 91, p. 247-258, 2018. DOI: <https://10.1093/forestry/cpy005>

EUROPEAN STANDARD. **EN 1310**: Round and sawn timber- method of measurement of features. United Kingdom, 20p. 1997.

EUROPEAN STANDARD. **EN 384**: Structural timber – determination of characteristic values of mechanical properties and density. United Kingdom, 18 p. 2004.

EUROPEAN STANDARD. **EN 408**: Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – determination of some physical and mechanical properties. United Kingdom, 42 p. 2012.

EUROPEAN STANDARD. **EN 338**: Structural timber – strength classes. United Kingdom, 16 p. 2016a.

EUROPEAN STANDARD. **EN 14081-1**: Timber structures – strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements. United Kingdom, 42 p. 2016b.

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.

FIORELLI, J.; DIAS, A.A.; COIADO, B. Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de *Pinus* spp.: correlação entre a resistência à tração e a classificação visual. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, n. 33, v. 4, p. 741-750, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000400017>.

FPL, Forest Products Laboratory. **Wood handbook: wood as an engineering material**. General Technical Report FPL- GTR-190, 2010: 509 p.

FRANCO, A.F.P. **Madeiras brasileiras: Guia de combinação e substituição**. Edgard Blucher, 2013

FRIHART, C.R.; HUNT, C.G. **Adhesives with wood materials**: bond formation and performance. Madison: Forest Service, 2010, Chap. 10 (USDA FPL General Technical Report, 190).

GATEADOS. Colheita Florestal - 2º Desbaste. Disponível em: http://gateados.tempsite.ws/novo/manejo/colheita_florestal_2_desbaste.php. Acesso em: 03 de maio de 2022.

GOLÇALEZ, J.C.; SANTO, N.; SILVA JUNIOR, F.G.S.; SOUZA, R.S.; PAULA, M.H. Growth ring of *Pinus caribaea* and its relationship with wood properties. **Scientia forestalis**, v. 46, n. 120, p. 670-678, 2018. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n120.15](https://doi.org/10.18671/scifor.v46n120.15)

GREEN, D.W.; EVANS, J.W. The immediate effect of temperature on the modulus of elasticity of green and dried lumber. **Wood and fiber science**, v.40, n. 3, p. 374-383, 2008.

GREEN, D.W.; LINK, C.L.; DeBONIS, A.L.; McLAIN, T.E. Predicting the effect of moisture content on the flexural properties of southern pine dimension lumber. **Wood and fiber science**, v. 18, n. 1, p. 134-156; 1986

GRYC, V.; HORACEK, O.; SLEZINGEROVA, J.; VAVRČIK, H. Basic density of spruce wood, wood with bark and bark of branches in locations in the Czech Republic. **Wood research**, v. 56, n. 1, p. 23 - 32, 2011.

HAMBURG, M. **Statistical analysis for decision making**. 2ed. Harcourt Brace Jovanovich. Inc, New York, USA. 1967.

HASSLACHER NORICA TIMBER. Disponível em:
https://www.hasslacher.com/data/_dateimanager/broschuere/HNT-CLT1250-EN.pdf. Acesso em 03 de maio de 2022.

HEIN, P.R.G.; SILVA, J.R.M.; BRANCHERIAV, L. Correlations among microfibril angle, density, modulus of elasticity, modulus of rupture, and shrinkage in six years of *Eucalyptus urophylla*, *E. grandis*. **Maderas, Ciencia y tecnologia**, v.15, n. 2, p.171-182. 2013.

HINDMAN, D.P.; BOULDIN, J.C. Mechanical properties of southern pine cross laminated timber. **J. Materi. Civ. Eng.**, v. 27, n. 9, 04014251, 2015.

HOSSEIN, M.A.; SHAHVERDI, M.; ROOHNIA, M. The effect of wood knot as a defect on Modulus of elasticity (MOE) and dumpling correlation. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 3, n. 3, p. 145-149, 2011. DOI:
<https://doi.org/10.15835/nsb336119>

IDO, H; NAGAO, H.; KATO, H.; MISURA, S. Strength properties and effect of moisture content on the bending and compressive strength parallel to the grain of sugi (*Cryptomeria japonica*) round timber. **Wood Science**, v. 59, n. 1, p. 67-72, 2013.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORE (IBÁ). **Relatório Ibá 2019**. 80p. 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORE (IBÁ). **Relatório Ibá 2020**. 66p. 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORE (IBÁ). **Relatório Ibá 2021**. 166p. 2021.

INOUE, M.T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARAUJO, A.J.; LIMA, R. Crescimento juvenil de *Pinus taeda* em função do espaço vital de crescimento. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 57-62, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **PEVS – Produção, extração vegetal e da silvicultura - 2019**. Rio de Janeiro, v. 34, p. 1-8, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **PEVS – Produção, extração vegetal e da silvicultura - 2021**. Rio de Janeiro, v. 36, p. 1-8, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION- **ISO 13061-2**. Physical and mechanical properties of wood test methods for small clear wood specimens part 2: determination of density for physical and mechanical tests. 5p. 2014

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION- **ISO 9709**. Structural timber – visual strength grading – basic principles. 39p. 2018

JANKOWSKY, P. Madeira Juvenil: formação e aproveitamento industrial. **IPEF**, Circular técnica, n. 81, 1979.

JOSCA, L.A.; MIDDLETON, G.R. **A discussion of wood quality attributes and their practical implications**. Forintek Canada Corp. British Columbia. Special Publication. n SP-34. 42 p. 1994.

JUDD, W.S.; CAMPBELL, C.S.; KELLOGG, E.A.; STEVENS, P.F.; DONOGUE, M.J. **Sistemática vegetal: um enfoque filogenético**. Porto Alegre: Artmed, 2009.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.; NIGOSKI, S.; BITTENCOURT, E. Características dos traqueóides da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* HE Moore e *Pinus taeda* L. In: Congresso ibero-americano de investigación en celulosa y papel, 2002, **Anais...** 2002.

KOHLER, S.V.; KOEHLER, M.S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J.E.; MACHADO, S.A. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 545-554, 2015.

KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of wood science and technology – II - Wood based material**. Berlin: Springer-Verlag, 1975.

KOPONEN, T.; KARPPINEN, T.; HÆGGSTROM, E.; SARANPAA, P.; SERIMAA, R. The stiffness modulus in Norway spruce as a function of year ring. **Holzforschung**, v. 59, n. 4, p. 451–455, 2005.
<https://doi.org/10.1515/HF.2005.074>

KOUBAA, A.; TON, Y.; ZHANG, S.Y.; MAKVI, S. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based in intra-ring wood density, profiles from X-Ray densitometry. **Am. For. Sci**, v. 59, n. 5-6, p. 511-518, 2002.

KRAMER, A.; BARBOSA, A.R.; SINHA, A. Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross laminated timber applications. **Journal of Materials in civil engineering**, v. 26, n. 7, 06014009. 2014. DOI:
[https://10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000936](https://10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000936).

KRETSCHMANN, D.E. **Mechanical Properties of wood**. In: FPL, Wood Handbook – Wood as an engineering material, Madison (WI): U.S Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.

LARA PALMA, H.A.; BALLARIN, A.W. Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, n. 64, p. 13-22, 2003.

LARSON, P.R.; KRETSCHMANN, D.E.; CLARK III, A.; ISEDRANDS, J.G. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis**. General Technical Report FPL-GTR-129, 2001, Madison, Wisconsin, 42p.

LASSERRE, J.P.; MASON, E.G.; WATT, M.S.; MOORE, J.R. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. **Forest Ecology Management**, v. 258, p. 1924–1931, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.028>

LEDFORD, D.; McTAGUE, J.P.; TWADDLE, A.; RAKESTRAW, J.; DAHLEN, J. Impact of age and site index on lumber quality of intensively managed stands. **Southern Regional Extension Forestry**, Athens, SREF-WP-001, p. 1-19, 2015

LEITE, H.G. **Conversão de troncos em multiprodutos de madeira, utilizando programação dinâmica**. 1994. 230f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1994.

LLANA, D.F.; IÑIGUES-GONZALES, G.; ARRIAGA, F. Influence of temperature and moisture content on non-destructive measurements in Scots pine wood. **Wood Research**, v. 59, n. 5, p. 769-780, 2014.

LOUREÇON, T.V.; MATTOS, B.D.; GATTO, D.A.; BULIGON, E.A.; HASELEIN, C.R. Determinação da idade de transição entre o lenho juvenil e adulto. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 251-260, 2014.

LUIZ, J. Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada colada cruzada (X-Lam). In: LOURENÇO, P.B.; BRANCO, J.M (Ed.). **Casas de Madeira**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, p. 49-62, 2013.

MACHADO, J.S.; LOUZADA, J.L.; SANTOS, A.J.A.; NUNES, L.; ANJOS, O.; RODRIGUES, J. SIMÕES, R.M.S.; PEREIRA, H. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melazozuon*). **Materials and design**, v.56, p. 975-980, 2014.

MACHADO, S.A.; SILVA, L.C.R.; JASKIU, E.; CAVALHEIRO, R. Comparação entre análise de tronco digital e convencional com árvores de *Mimosa scrabella* Bentham e *Pinus taeda* L. **Revista árvore**, v.37, n. 2, p. 329-337, 2013.

MAINARDI, G.L.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. Produção de *Pinus taeda* L. na região de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 39-52. 1996.

MANIA, P.; SIUDA, F.; ROSZYK, E. Effect of slope grain on mechanical properties of different wood species. **Materials**, v. 13, n. 7, p. 1503, 2020.

MANHIÇA, A.A. **Rendimento e eficiência no desdobro de *Pinus* sp. utilizando modelos de corte numa serraria de pequeno porte**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MANSFIELD, S.D., PARISH, R.; DI LUCCA, C.M.; GOUDIE, J.; KANG, K.Y.; OTT, P. Revisiting the transition between juvenile and mature wood: a comparison of fibre length, microfibril angle and relative wood density in lodgepole pine. **Holzforschung**, v. 63, p.449-456, 2009. DOI: <https://10.1515/hf.2009.069>

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

MARINI, L.J.; ALMEIDA, T.H.; ALMEIDA, D.H.; CHRISTOFORO, A.L.; LAHR, F.A.R. Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus* sp. pela colorimetria. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 149-160, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100499>

MELO, R.R. Radial and longitudinal variation of *Pinus taeda* L. wood basic density in different ages. **Revista de Ciência Agrárias**, v. 58, n. 2, p. 192-197, 2015.

MOORE, J. R; LYON, A. J.; LEHNEKE, S. Effects of rotation length on the grade recovery and wood properties of Sitka spruce structural timber grown in Great Britain. **Annals of Forest Science**, v. 69, p. 353-362, 2012.

MOORE, J.R.; LYON, A.J.; SEARLES, G.J.; LEHNEKE, S.A.; RIDLEY-ELLIS, D.J. Within and between stand variation in selected properties of Sitka spruce sawn timber in the UK: implications for segregation and grade recovery. **Annals of Forest Science**, n. 70, p. 403-415, 2013. DOI 10.1007/s13595-013-0275-y

MOYA, L.; LAGUARDA, M.F.; CAGNO, M.; CARDOSO, A.; GATTO, F.; O'NEIL, H. Physical and mechanical properties of loblolly pine and slash pine wood from Uruguayan plantations. **Forest Products Journal**, v. 63, n. 3-4, p.128-137, 2013.

MURARA JUNIOR, M.F.; ROCHA, M.P.; TIMOFEICZYK, R. Rendimento em madeira serrada de *Pinus taeda* para duas metodologias de desdobro. **Floresta**, Curitiba- PR, v. 35, n. 3, p. 473-483, 2005.

MURARA JUNIOR, M.F.; ROCHA, M.P.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R. Análise dos custos do rendimento em madeira serrada de *Pinus taeda* para duas metodologias de desdobro. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n.3, p. 477-484, 2010.

MURARA JUNIOR, M.I.; ROCHA, M.P.; TRUGUILHO, P.F. Estimativa do rendimento em madeira serrada e *Pinus* para duas metodologias de desdobro. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 4, p. 556-563, 2013.

MUSTEFAGA, E.C.; HILLIN, E.; TAVARES, E.L.; SOZIM, P.C.L.; RUSCH, F. Caracterização física-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 472-481, 2019.

NASCIMENTO, A.M.; OLIVEIRA, J.T.S.; DELLA LUCIA, R.M. Classificação e propriedades da madeira de *Pinus* e eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 27-35, 2001.

NOCETTI, M.; BRUNETTI, M.; BACHER, M. Effect of moisture content on the flexural properties and dynamic modulus of elasticity of dimension chestnut timber. **Eur. J. Wood Prod**, v. 73, p. 51-60, 2015.

NORMA PORTUGUESA – **NP EN 1912**. Madeira para estruturas. Classes de resistência. Atribuição de classes de qualidade e espécie, Lisboa: IPQ, 2013.

NORMA PORTUGUESA - **NP 4305**. Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual, Lisboa: IPQ, 1995.

NUTTO, L.; MACHADO, S.A.; CAVALHEIRO, R.; SILVA, L.C.R. Comparação de metodologia para a medição de anéis de crescimento de *Mimosa scrabella* e *Pinus taeda*. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 135-144, 2012.

PALERMO, G.P.; 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.

PEREIRA, M.C.M.; CALIL JUNIOR, C. Strength and stiffness of cross laminated timber (CLT) panels produced with *Pinus* and Eucalyptus: Experimental and analytical comparisons. **Matéria**, Rio de Janeiro, n. 24, v. 2, 2019.

PFEIFER. Disponível em: <https://www.pfeifergroup.com/en/products/timber-construction/clt/key-data/>. Acesso em 03 de maio de 2022.

PLACKER, H. Brettsperrholz wächst global. Disponível em: https://holzkurier.com/schnittholz/2015/02/brettsperrholz_wachstglobal.html. Acesso em: 28 de março de 2022.

POLLET, C.; HENIN, J.M.; HEBERT, J.; HOUREZ, B. Effect of growth rate on the physical and mechanical properties of Douglas-fir in western Europe. *Can. J. For.*, v. 47, p. 1056-1065, 2017.

POWER, H.; FRANCHESCHINI, T.; SCHNEIDER, R.; DUCHESNE, I.; BERNINGER, F. Crown characteristics slightly improve lumber mechanical properties models for black spruce (*Picea mariana*) (Mill.) BSP. **The forestry chronicle**, v. 92, n. 2, p. 245-253, 2016.

RAIS, A.; POSCHENRIEDER, W.; PRETZSCH, H.; van de KUILEN, J.W.G. Influence of initial plant density on sawn timber properties for Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). **Annals of Forest Science**, v. 71, p. 617–626, 2014.

RAVENSHORST, G.; GARD, W.; KUILEN, J.W. van de. Influence of slope of grain on the mechanical properties of tropical hardwoods and the consequences for grading. **European Journal of wood and wood product**, v. 78, p. 915-921, 2020.

ROSA, T.O.; VIEIRA, H.C.; TEREZO, R.T.; CUNHA, A.B.; SAMPAIO, C.A.P., ZANGALI, C., ROSA, G.O.; WALTRICK, D.B. Classificação visual e mecânica da espécie *Cryptomeria japonica* D. Don para utilização tem madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 2, p. 451-462, 2020.

ROSOT, M.A.D.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DISPERATI, A.A.; EMERENCIANO, D.B. Análise do tronco digital: uma nova metodologia para a medição de anéis de crescimento. **Floresta**, v. 33, n. 3, p. 235-255, 2003.

ROTH, B.E.; XIABO, L.; DUDLEY, A.; HUBER, G.F.P. Effects of management intensity, genetics and planting density and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA. **Forest Ecology and Management**, v. 246, p. 155-162, 2007. DOI: <https://10.1016/j.foreco.2007.03.028>

RUBNER HOLZ. Disponível em: https://www.rubner.com/fileadmin/marken/holzbau/Solutions/Supply/ENG_X-Lam_CLT_Technical_Data_06-2018.pdf. Acesso em: 03 de maio de 2022.

RUUSKA, A. Carbon footprint for building products: ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products. Finland: VTT technology 115, 2013. 126p.

SAMUELSON, L.J.; EBERHARDT, T.L.; BARTKOWIAK, S.M.; JOHNSEN, K.H. Relationships between climate, radial growth and wood properties of mature loblolly pine in Hawaii and a northern and southern site in the southeastern United States. **Forest ecology and management**, v. 310, p. 786-795, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.025>

SANTINI, E.J.; HASELEIN, C.R.; GATTO, D.A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 85-93, 2000. DOI: <https://doi.org/10.5902/19805098397>

SCHILLINGER HOLZ. Disponível em: https://www.schilliger.ch/wp-content/uploads/pdf/Flyer_CLT_Cross_laminated_timber.pdf. Acesso em: 03 de maio de 2022.

SHIMIZU, J.Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Ed: Shimizy, J:Y. Colombo-PR: Embrapa, 2008. 226p.

SCHIMLECK, L.; ANTONY, F.; DAHLEN, J.; MOORE, J. Wood and fiber quality of plantation-grown conifers: a summary of research with an emphasis on Loblolly pine and Radiata pine. **Forests**, v. 9, n. 6, p. 298. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9060298>

SKAAR, C. Water in wood. Syracuse University Press, New York, 1972. 212p.

SOPUSHYNSKY, I.; KHARYTON, I.; TEISCHINGER, A.; MAYEVSKYY, V.; HRYNYK, H. Wood density and annual growth variability of *Picea abies* (L.) Karst. Growing in the Ukrainian Carpathians. **Eur. J. Wood Prod.**, v. 75, p. 419-428, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1079-1>

SOUZA, R.C.; GIOVANINI, J.N. Efeito da idade e da posição radial na densidade básica e dimensão dos traqueóides da madeira de *Pinus taeda* L. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 119-127, 2007.

STANGERLIN, D.M.; CALEGARI, L.; SANTIM, E.J.; DOMINGUES, J.M.X.; GATTO, D.; MELO, R.R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.3, n.2, p. 145-150. 2008.

TEREZO, R.F.; ROSA, T.O.; BOURSCHEID, C.B.; SAMPAIO, C.A.P.; JUHN, L.S.; JACINTO, R.C. Comparação do custo de produção de painel CLT produzido artesanalmente com outros materiais de construção convencionais. **Brazilian Journal of development**, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 68584-68590, 2020.

TREVISAN, R.; MOTTA, C.I.; FIORESI, T.; TRAUTENMULLER, A.V.; RABUSKE, J.R.; DENARDI, L. Idade de segregação do lenho juvenil e adulto para *Pinus elliottii* Engel. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 4, p. 634-638, 2014.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J.L.M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J.G. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 503-510, 2013.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J.L.M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J.G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 21-28, 2014.

TROVATI, L.R.; FERRAZ, M.E.S.B. Influência da precipitação e da temperatura na densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa*. **IPEF**, n. 26, n. 26, p. 31-36, 1984.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **2022 Global status report for buildings and construction**: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. Nairobi, 2022. 100 p.

VAUGHAN, D.; AUTY, D.; DAHLEN, J.; MEADO, A.J.S.; MACKES, K.H. Modelling variation in wood stiffness of *Pinus ponderosa* using static bending and acoustic measurements. **Forestry**, v. 94, n. 2, p. 232-243, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa030>

VERKERK, P.J.; LEVERS, C.; IVEMMERLE, T.; LINDNER, M.; VALBUENA, R.; VERBURG, P.H.; ZUDIN, S. Mapping wood production in European forests. **Forest Ecology and management**, v. 357, p. 228-238, 2015.

VIANNA NETO, J.A. Considerações básicas sobre desdobro de *Pinus* spp. **Silvicultura**, v. 9, n. 34, p. 15-19, 1984.

VIDAURRE, G.B.; LOMBARDI, L.R.; OLIVEIRA, J.S.; ARANTES, M.D.C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2011.066>

VIKRAM, V.; CHERRY, M.L.; BRIGGS, D.; CRESS, D.W.; EVANS, R.; HOWE, G.T. Stiffness of Douglas-fir lumber: effects of wood properties and genetics. **Can. J. For. Res.**, n. 41, p. 1160-1173, 2011.

VILELA, R.; MASCIA, N.T. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* provenientes de placas de cross laminated timber. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 89-110, 2021.

VITAL B.R. **Planejamento e operação de serrarias**. Viçosa: Editora UFV, 2008.

VIVIAN, M.A.; SEGURA, T.E.S.; BONFATTI JUNIOR, E.A.; SART, C.; SCHMIDT, F.; SILVA JUNIOR, F.G.; GABOV, K.; FARDIM, P. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 183-191, 2015.

WATT, M.S.; CLINTON, P.C.; PARFITT, R.L.; ROSS, C.; COKER, G. Modelling the influence of site and weed competition on juvenile modulus of elasticity in *Pinus radiata* across broad environmental gradients. **For. Ecol. Manag.**, v. 258, p. 1479–1488, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.003>

WESSELS, C.B.; DOWSE, G.P.; SMIT, H.C. The flexural properties of young *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* timber from the Southern Cape and their prediction from acoustic measurements. **South. For. J. For. Sci.** v. 73, n. 3-4, p. 137–147, 2011.

WESSELS, C.B.; MALAN, F.S.; SEIFERT, T.; LOUW, J.H.; RYPSTRA, T. The prediction of the flexural lumber properties from standing South African-grown *Pinus patula* trees. **European J. Forests Res.**, v. 134, p. 1-18, 2015.

ZOBEL, B.J.; KELLISON, B.C.; KIRK, D.G. Wood properties of young loblolly pine and slash pines. In: Proceeding of the Symposium on the effect of growth acceleration on the properties of wood. 1971, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin. **Anais...** Madison, 1971, p. M1 - M-22.

ZOBEL, B.J., SPRAGUE, J.R. **Juvenile wood in forest**. Berlin: Heiderlberg, 1998.

ZOBEL, B.J.; van BUIJTENEN, J.P. **Wood variation: its causes and control**. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

CAPÍTULO 2 – PAINEL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA

6 REVISÃO DE LITERATURA DOS PAINÉIS MLCC

6.1 PAINEL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA

O painel de madeira lamelada colada cruzada (MLCC), do inglês *Cross Laminated Timber* (MLCC), também chamado de X-LAM, é um produto engenheirado semirrígido à base de madeira. Ele é produzido em forma de placa, normalmente composto por um número ímpar de camadas sobrepostas cruzadas e coladas por um adesivo estrutural com um ângulo 90° (Figura 32), variando de no mínimo três até cinco, sete ou mais camadas (BRAHAM; CASILLAS, 2021; BRANDNER *et al.*, 2016).

Figura 32 – Ilustração da distribuição das lamelas em um painel MLCC de três camadas.



Fonte: A autora (2023).

Como as camadas do painel são cruzadas, ele consegue suportar carregamentos paralelos e perpendiculares ao plano do painel, podendo ser usado para elementos construtivos como pisos ou paredes de fechamento e/ou sustentação. Conforme o objetivo e o tipo de fabricação, o MLCC é um produto que pode apresentar grandes dimensões, seja na espessura, largura ou comprimento. Por isso, é um produto de elementos estruturais com grande potencial, versátil e aplicável em diversas situações de construção (BRANDNER *et al.*, 2016).

É considerado um material de construção verde, uma vez que usa abundantemente a madeira em sua produção. Ele gera benefícios como o sequestro de carbono, a redução das emissões de gases de efeito estufa e menor custo quando comparado ao concreto e ao aço. Por isso, este painel se tornou um material de construção alternativo que combina as vantagens das estruturas sólidas enquanto é produzido por recursos renováveis (BRAHAM; CASILLAS, 2021).

6.2 VANTAGENS DO MLCC

O MLCC apresenta muitas vantagens que serão descritas a seguir, baseando-se nos estudos publicados por Brandner *et al.* (2016), Izzy *et al.* (2018), Dong *et al.* (2019), Passarelli (2013), Lan, Kelly e Prakash Nepal (2020), Gu e Bergman (2018), Kramer, Barbosa e Sinha (2014), Mallo e Espinoza (2014), Asdrubali *et al.* (2017), Klippel e Schmid (2017) e Liu *et al.* (2016).

O MLCC permite um alto nível de pré-fabricação, suas dimensões podem ser estipuladas na indústria e por isso, elementos estruturais de grandes dimensões podem ser fabricados com elevado acabamento e estarem prontos para a montagem no pátio de obras.

Com relação à física da construção e em comparação com construções de madeira de baixo peso, o MLCC tem menor permeabilidade do ar e uma capacidade específica de estocar energia térmica.

Armazena por longos períodos o carbono da atmosfera, e permite a reciclagem, tornando-o um material considerado sustentável.

Apresenta alta estabilidade dimensional no plano, além de melhores propriedades mecânicas quando comparado a outros materiais. Na espessura, o inchamento e contração devem ser considerados os da madeira sólida.

A baixa massa específica, permite que o MLCC seja utilizado em construções localizadas em regiões de solos com fracas propriedades de carga.

Quando comparado aos materiais de construção a base de minerais, e.g. concreto, as construções com o MLCC são caracterizadas pela rápida construção. Isso se dá devido ao alto grau de pré-fabricação e montagem dos

elementos de larga dimensão, pela construção seca no local, alta precisão, baixa massa e elementos delgados.

O MLCC se tornou mais do que um substituto alternativo à materiais a base de minerais, ele é uma alternativa de alto valor, já que ele proporciona características de conforto ao usuário, seja ele acústico, térmico ou estético.

6.3 HISTÓRICO MUNDIAL DOS PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA

O MLCC é um produto engenheirado considerado relativamente novo no mercado de elementos de madeira. Embora a ideia do produto tenha sido iniciada nos anos 70 e 80, os painéis foram desenvolvidos na Áustria, Suíça e Alemanha na década de 1990. Inicialmente era um produto que poderia utilizar os resíduos de madeira produzidos pelas fábricas, mas logo em seguida, pesquisas modernizaram o painel e o transformaram na forma que é conhecido hoje (STAUDER, 2013; FINK *et al.*, 2018).

Em artigos publicados de Brandner (2013) e Brandner *et al.* (2016) é descrito um estado da arte sobre alguns tópicos relacionados ao MLCC, como a produção, tecnologia, o histórico dos painéis na Europa, em especial na Europa Central (Áustria e Alemanha) desde o início do desenvolvimento da ideia até os dias atuais.

Os painéis MLCC tiveram a primeira patente registrada em 1985 na França, porém foi amplamente difundido apenas nos anos 1990, na Alemanha e Áustria (FINK *et al.*, 2018; SANBORN *et al.*, 2019). De acordo com Brandner (2013) e Brandner *et al.* (2016), nos últimos 15 anos, a madeira ganhou um espaço anteriormente dedicado aos materiais de construção a base de minerais, para a construção de edifícios residenciais e escritórios. Isso se deve principalmente ao medo da combustão de materiais ter diminuído ao utilizar tecnologias como o MLCC. A tecnologia envolvida no MLCC, suas grandes dimensões, sua fácil trabalhabilidade e aplicabilidade, permitiu às engenharias da madeira expandir o mercado que durante os 100 últimos anos eram reservados para materiais a base de minerais. Isso ampliou as capacidades de construções realizáveis, como superestruturas e construções monolíticas realizadas com elementos laminares de madeira.

Da criação dos painéis em 1980 até a primeira aprovação técnica estar pronta, foram necessários 20 anos. A primeira aprovação técnica foi lançada em 1998 e apenas em 2006 se iniciou, de fato, as regulações dos painéis MLCC pelas aprovações técnicas (ETA – *European Technical Approvals*). Contudo, desde 2006 e até os dias atuais, as propriedades e projetos do MLCC ainda são regularizados apenas por avaliações ETA (BRANDNER, 2013). As primeiras atividades para regularizar o material na Europa por meio de normas técnicas, iniciaram em 2008 e a primeira norma europeia para os painéis, a “EN 16351– *Timber structures: cross laminated timber – requirements*” foi publicada em 2014.

No entanto, embora a norma trate de recomendações e configurações de testes, da produção e ensaio dos painéis, como tipo de adesivo, normas para a classificação da matéria-prima e critérios de ensaio de resistência, ela ainda não aborda valores padronizados de resistência dos painéis (EN, 2015; FINK *et al.*, 2018). Assim, desde 2010, o foco da ciência é na disseminação, padronização e maior estabelecimento do produto, aspectos esses que continuarão importante nos próximos anos (BRANDNER *et al.*, 2016).

Desde a criação do produto na década de 80, houve o estabelecimento em pequena escala de locais de produção dos painéis, porém nos últimos 15 anos o crescimento foi em escala industrial. Durante esse tempo, as capacidades de produção cresceram rapidamente, em torno de 15 – 20% a.a. Esses desenvolvimentos foram realizados principalmente na Áustria e Alemanha, com aproximadamente $500.000 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ de produção.

No ano de 2014, segundo Plackner (2015), o volume mundial aumentou para 625.000 m^3 . As intensas atividades ao redor do mundo, sugerem uma corrida do MLCC e um aumento constante no volume produzido mundialmente (BRANDNER *et al.*, 2016).

No Brasil, a indústria desses painéis, é atualmente composta pela empresa CROSSLAM, localizada em Suzano, São Paulo, sendo a pioneira no setor na América Latina (CROSSLAM, 2018). A *startup* LAMELAR – Painéis Autoportantes, localizada em Lages, Santa Catarina, está iniciando o planejamento das pesquisas/atividades com os painéis produzidos com *Pinus taeda*. No Sul do Brasil, no Estado do Paraná, está em fase de instalação a Urbem, empresa de elementos em madeira da AMATA.

6.4 EXEMPLOS DE USO EM CONSTRUÇÕES

Em edifícios de múltiplos pavimentos é comum o uso do MLCC associado a outros materiais ou sistemas estruturais, como concreto e/ou aço, até mesmo vigas e pilares de MLC, chamados de edifícios híbridos. Essa mescla de materiais estrategicamente determinados, faz com que se aproveite o melhor desempenho de cada um dos materiais em quesitos como sustentabilidade, rigidez, eficiência térmica, acústica e economia, entre outros (VILELA, 2020).

Na Tabela 36 estão apresentados alguns exemplos de edifícios em MLCC já construídos em diversos lugares do mundo. Alguns edifícios serão discutidos resumidamente nos parágrafos que seguem.

Tabela 36 - Exemplos de edifícios com MLCC e com outros elementos estruturais como MLC ou aço.

Nome	Local	Andares	Ano
Limnologen	Växjö, Suécia	8	2009
Stadthaus	Londres, Reino Unido	9	2010
Bridport House	Londres, Reino Unido	8	2010
Holz8 Bad	Aibling, Alemanha	7	2011
Forte	Melbourne, Australia	10	2012
Via Cenni	Milao, Italia	9	2013
Treet	Bergen, Noruega	14	2014
Mjøstårnet	Brumunddal, Noruega	18	2019
Dengo	São Paulo, Brasil	4	2020

Fonte: A autora (2023).

O edifício *Stadthaus* é um prédio multifamiliar, localizado em Hackney, leste de Londres, Inglaterra. Ele foi projetado pelo escritório de arquitetura de Waugh Thistleton e desenvolvido pela empresa Techniker Ltd. O fornecimento e montagem dos painéis foi realizado pela empresa austríaca KLH. O edifício conta com uma área de base de 289 m² e nove pisos, constituído por 29 apartamentos. Devido ao alto nível de industrialização do sistema, o tempo total para construir o edifício, considerando o tempo de fornecimento dos painéis, foi 49 semanas (tempo em concreto seria de 72 semanas). Os painéis de MLCC

foram produzidos na Áustria e transportados até o Reino Unido por meio de caminhões, sendo o transporte, o fator limitante para o tamanho dos painéis em 14,00 m x 2,95 m. Concluído em 2010, esta obra se tornou referência entre os edifícios de MLCC devido a conceitos inovadores para o sistema. O edifício foi realizado com paredes e pisos em madeira maciça com painéis bidirecionais de MLCC (Figura 33). A aceitação do público foi grande, em menos de 2 horas após o lançamento para vendas, as unidades estavam esgotadas (COSTA, 2013; WAUGHT *et al.*, 2010).

Figura 33 - Edifício *Stadhaus*, Murray Grove, Londres, com nove andares.



Fonte: Waugh Thistleton Architects. (2022)

Em Milão, Itália foi construído o complexo residencial “*Cenni di cambiamento*” (Figura 34). É o primeiro complexo social construído em MLCC na Europa. O complexo constituído por 124 apartamentos, com tamanhos diversos, possui classe energia A. A área do projeto é constituída por 1700 m² e o projeto foi do arquiteto Fabrizio Rossi Prodi, com escritório em Firenze. No projeto todas as quatro torres foram construídas com painéis MLCC e com 9 andares (27 m de altura), além de contar com unidades comerciais. O tempo de construção no canteiro foi de 17 meses (COSTA, 2013; FERRARO, 2013; CENNI DI CAMBIAMENTO, 2022).

Figura 34 - Projeto do complexo residencial Via Cenni, Milão, Itália.



Fonte: Cenni di cambiamento (2022).

No município de Brumunddal na Noruega, foi concluído em março de 2019 o maior edifício de madeira do mundo até o momento. O Mjøstårnet (Figura 35) possui 18 andares projetados com mistura de materiais. Ele é suportado por pilares de MLC e as paredes e pisos são constituídos de placas de MLCC, com um total de 2.600 m³ de elementos em madeira utilizados na obra. A área de 15.000 m², com 85,4 m de altura, garantiram até o momento o título de maior edifício de madeira do mundo. O edifício é constituído por 33 apartamentos, 72 quartos de hotel, escritórios, um restaurante, um terraço no topo, um centro de conferências e área de uso comum. Os trabalhos de construção da estrutura de base começaram em abril de 2017 e em setembro de 2017, iniciaram a instalação das estruturas de madeira. A cerimônia de inauguração estrutural foi realizada em setembro de 2018 e o prédio foi oficialmente aberto em março de 2019 (DESIGN BUILD NETWORK, 2019).

No Brasil, o escritório de arquitetura Triptyque divulgou o projeto de um edifício de uso misto em São Paulo. A proposta é uma iniciativa da empresa florestal AMATA e prevê uma torre de 13 pavimentos com total de 4.700 m². Sua estrutura será construída em MLCC e toda a madeira será certificada. O edifício que será chamado AMATA, ilustrado na Figura 36, estava previsto para ser realizado entre 2017 e 2020 e permitirá múltiplas funções como escritórios, habitações residenciais, lojas e restaurantes (TRYPTYQUE ARCHITECTURE, 2022; BARATTO, 2017).

Figura 35 - Edifício Mjøstårnet (Noruega) de construção mista de Madeira Lamelada Colada (MLC) e painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC).



Fonte: ArchDaily (2022).

Figura 36 – Imagem do projeto do edifício escalonado AMATA, Na Vila Madalena, São Paulo Brasil com 13 pavimentos.



Fonte: Triptyque (2022).

Também em São Paulo, foi inaugurado em 2020 o edifício comercial da Dengo, com 4 pavimentos de elementos de madeira mista (Figura 37). O edifício está localizado na rua Faria Lima e o escritório de arquitetura Matheus Farah e Manoel Maia desenvolveu o projeto. Os pisos de MLCC serão fornecidas pela Urbem (AMATA), empresa em fase de implementação da fábrica, com parceria da empresa austríaca KLH. As vigas e pilares foram produzidos pela empresa brasileira Rewood (SANTIAGO, 2020).

Figura 37 - Fachada do edifício comercial de 4 pavimentos na rua Faria Lima (lado esq.), com destaque para os pisos em MLCC (lado dir.).



Fonte: Fran Parente (2022).

6.5 PROCEDIMENTOS PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS MLCC

O processo produtivo dos painéis MLCC nos estágios iniciais é semelhante ao da MLC:

- As lamelas utilizadas são previamente serradas e secas com umidade média de 12%. A espessura não é padronizada, mas a maioria dos produtores utiliza uma espessura variando de 20 a 50 mm.

- Todas as lamelas passam por classificação mecânica e visual para garantir a qualidade. Nesse momento as lamelas são segregadas segundo a classe de qualidade.

- Em casos de lamelas com alguns defeitos, como nós, estes podem ser cortados e com uma emenda *finger-joint* é feita a união das duas peças. A emenda *finger-joint* também é executada para unir as lamelas no sentido longitudinal, de modo a obter grandes comprimentos.

- Em seguida, as lamelas são plainadas nas superfícies para abertura das células da madeira para garantir a melhor ancoragem do adesivo e padronização da espessura.

- Para iniciar o processo de colagem, as lamelas são dispostas lado a lado. Nessa etapa, há duas formas de produção, conforme a escolha da empresa. Na primeira, as lamelas dispostas lado a lado podem ser coladas nas laterais, formando uma camada. Com essas camadas formadas, se realiza etapa de uni-las entre si, sempre ortogonalmente (90.º), colando-as com um adesivo. Os painéis MLCC são sempre compostos de um número ímpar de

camadas, no mínimo três. Na segunda forma de compor o painel, a colagem lateral das lamelas não ocorre. Ou seja, na linha de produção o adesivo é colocado na área da largura das lamelas e elas passam diretamente para a área de formação do painel. Quando uma camada fica pronta, as lamelas são rotacionadas em 90.° para compor a camada seguinte do painel.

– Com todas as camadas organizadas, o painel passa pela prensagem. O tempo e pressão de prensagem varia conforme as recomendações do fabricante do adesivo utilizado e da tecnologia da fábrica para realizar a produção em maior ou menor tempo.

– Os adesivos utilizados são sempre confeccionados para fins estruturais, o mais usado é a base de poliuretano (KARACABEYLI, 2013). A gramatura também depende do tipo de adesivo, mas, em geral, pode variar de 200 a 300 g.m⁻².

– Com o painel prensado, ele passa imediatamente para a área de corte. Nessa etapa, com o auxílio de máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC), os painéis são cortados para determinar o tamanho e características específicas do projeto, como janelas e portas.

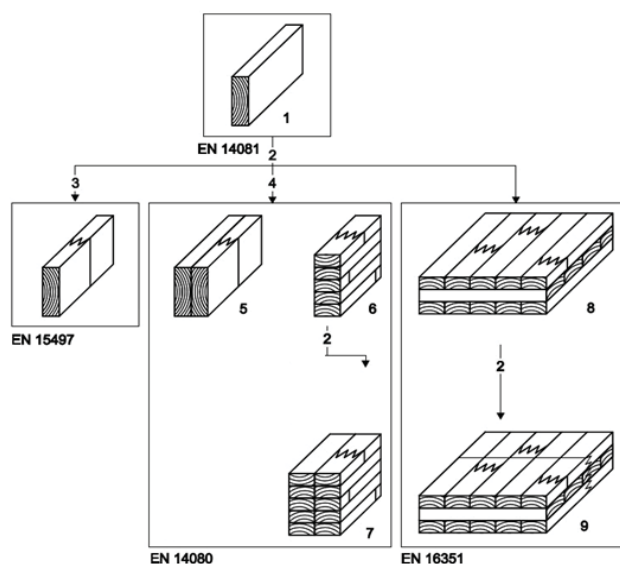
Todo o processo de produção é realizado com base em normativas para garantir a qualidade final do painel. No Brasil, os processos iniciais da produção podem ser realizados utilizando as recomendações da NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2022c) uma vez que é semelhante aos aspectos normativos europeus.

O processo normativo para produção dos painéis MLCC na Europa parte do princípio básico de que são formados por lamelas de madeira. A norma europeia EN 16351 (EN, 2015), considera 4 estágios para a manufatura de um painel MLCC:

- a) o painel é formado por lamelas de madeira; no que diz respeito à umidade e processos como classificação visual e mecânica das lamelas, estes podem ser realizados e averiguados pela EN 14081 (EN, 2016). A própria norma estabelece os requisitos mínimos para as classificações das lamelas (Figura 38 – 1);

- b) caso necessário, a execução de *finger-joints*, deve ser realizada conforme a norma EN 15497 (EN, 2014), antes da distribuição e colagem das lamelas para o painel (Figura 38 – 3);
- c) devido à união de várias lamelas de madeira por adesivos, as premissas para a confecção e avaliação da linha de colagem são dadas pela EN 14080 (EN, 2013), que determina os requerimentos para Madeira Lamelada Colada Cruzada (Figura 38 – 4);
- d) por último são consideradas as propriedades gerais do painel (Figura 38 – 9) já montado e colado pela EN 16351 (EN, 2015).

Figura 38 - A relação das normas europeias para produção de painéis MLCC.



Fonte: Adaptado de EN 16351 (EN, 2015)

6.6 PARÂMETROS QUE AFETAM A QUALIDADE DA MLCC

Os parâmetros que podem interferir na qualidade das MLCC são inerentes à madeira utilizada no processo e ao processo em si. Com relação à madeira utilizada tem-se a densidade, teor de umidade, a espécie, a forma de corte da tábua, tangencial ou radial e a quantidade de lenhos juvenil e adultos presente nas tábuas. Já em relação à produção dos painéis, os principais fatores que influenciam podem ser as classes de resistência da madeira, o tipo de adesivo e a gramatura, o tempo e a pressão de colagem utilizados.

6.6.1 Variáveis inerentes à madeira

Dentre as variáveis inerentes à madeira que podem afetar a produção e performance dos painéis MLCC estão a densidade, teor de umidade, espécie, o diagrama de desdobro empregado na serraria e a quantidade de lenho juvenil e adulto.

A densidade é considerada uma das propriedades mais importantes, visto que está normalmente relacionada e explica outras propriedades da madeira. Esta propriedade comumente utilizada em pesquisas pode explicar ou estar correlacionada com características como resistência e rigidez à flexão (BALLARIN; PALMA, 2003), compressão (SERPA *et al.*, 2003), cisalhamento (GONÇALVES *et al.*, 2016), lenhos tardio e inicial (TROVATI; FERRAZ, 1984), lenhos juvenil e adulto (PALERMO *et al.*, 2013), assim como pode explicar a maior ou menor adesão do adesivo na madeira (KOLLMANN *et al.*, 1975).

Embora as espécies de abeto e pinho com a densidade entre 420 – 500 kg·m⁻³ sejam mais utilizadas na produção dos painéis na Europa (KRAMER; BARBOSA; SINHA, 2014), há estudos comprovando que espécies variadas e de baixa densidade apresentam resultados promissores para a fabricação de painéis MLCC.

Como exemplos tem-se Kramer, Barbosa e Sinha (2014), que estudaram o potencial do álamo de baixa densidade para a produção de painéis MLCC. Hindman e Bouldin (2015) que avaliaram a aplicabilidade de painéis MLCC confeccionadas com quatro espécies de *Pinus*, cuja densidade média era de 550 kg·m⁻³ e concluíram que os painéis apresentam resistência superior à normativa utilizada na comparação. Vilela e Mascia (2021) estudaram o potencial de painel fabricados de *Pinus taeda* proveniente de florestas brasileiras, cuja densidade média era de 595 kg·m⁻³.

Com relação ao teor de umidade, nota-se que as madeiras utilizadas para a produção de elementos colados como o painel de Madeira Lamelada Colada Cruzada devem apresentar uma faixa de teor de umidade entre 6 e 14%, uma vez que essa faixa pode proporcionar as melhores propriedades de adesão entre a madeira e o adesivo. O teor de umidade da madeira combinado à água presente nos adesivos pode influenciar significativamente no

umedecimento, fluxo e penetração do adesivo na madeira, consequentemente impactando na cura (FRIHART; HUNT, 2010).

O controle do teor de umidade pode influenciar principalmente em adesivos estruturais a base de poliuretano, uma vez que este utiliza a umidade presente como catalisador e altas umidades podem prejudicar a colagem (SHARIFNIA; HINDMAN, 2017). Isto foi observado no estudo conduzido por Hindman e Bouldin (2015) que ao avaliar a porcentagem de delaminação em painéis fabricados com *Southern pine*, obtiveram cerca de 12,3% a mais do que o valor permitido pela norma ANSI PRG 320 (ANSI, 2012). Os autores atribuíram a alta delaminação a falta de controle do teor da umidade da madeira no momento da colagem.

No que concerne a espécie, observa-se que esta pode ser diferente conforme o país e/ou região de produção. Na Europa, a matéria-prima utilizada na fabricação dos painéis MLCC é normalmente madeira de espécies de abeto e pinho, cuja classe média é C24 (BRANDNER *et al.*, 2015; KRAMER; BARBOSA; SINHA, 2014).

Brandner *et al.* (2015) afirmam que mesmo que na Europa a predominância seja a madeira de *Picea abies* para a produção de painéis, pelo mundo outras espécies locais são também usadas na fabricação, mesmo se as espécies apresentam menor qualidade mecânica do que a *Picea abies*. Isto é possível devido à sólida composição e homogeneização das propriedades das lamelas no painel MLCC.

Embora espécies com menores densidades normalmente sejam mais indicadas para a manufatura de painéis, dado a facilidade que o adesivo penetra nos poros da madeira e se adere, há estudos com espécies de alta densidade para a produção de painéis.

Pereira e Calil Junior (2019) confeccionaram e avaliaram em laboratório as propriedades da resistência e rigidez à flexão para painéis de *Eucalyptus urograndis*. Embora os autores não tenham correlacionado as propriedades com a densidade, os resultados indicaram um bom potencial da espécie para a produção de painéis.

Espécies com menores teores de extrativos também são preferíveis, pois podem influenciar na qualidade da colagem. A estabilidade dimensional

das espécies também deve ser considerada, buscam-se espécies com menor anisotropia para evitar falhas de colagem ou delaminação do painel.

Já o diagrama de desdobro pode afetar a geometria das tábuas. Pelas normativas a geometria da seção transversal dos produtos MLCC ainda não foi padronizada. As dimensões das lamelas e placas variam conforme o fabricante. Na Europa, maior centro produtivo desse painel, as espessuras das lamelas ou camadas de 20, 30 e 40 mm são cada vez mais comuns (ETA 12/0347, 2017; ETA 08/0238, 2018; ETA 11/0189, 2019; ETA 06/0138, 2017; ETA 14/0349, 2019; ETA 16/0115, 2018). Além disso, a norma europeia EN 16351 (EN, 2015) normaliza a espessura das lamelas entre 12 e 45 mm e a faixa da largura varia de 40 a 300 mm. Essa padronização visa uma razão entre a largura (b) e a espessura (h) de $b/h \geq 4$, pois essa razão afeta as forças de cisalhamento de rolamento no painel. Adicionalmente, a norma exige que essa razão seja declarada pelo fabricante.

Brandner *et al.* (2017) explica que se essa razão não é assumida, uma resistência reduzida do cisalhamento ao rolamento do painel (*rolling shear*) deve ser considerada. A razão para isto, segundo os autores, é o aumento na quantidade da tensão de tração perpendicular à fibra que, com as tensões de cisalhamento de rolamento nas camadas transversais, levam a uma notável diminuição da resistência do painel.

Esta constatação foi estudada por Ehrhart *et al.* (2015), que avaliaram a influência da geometria decorrente do desdobro. No estudo preliminar, os autores analisaram a geometria das lamelas utilizando a variação da largura e concluíram que a razão entre a largura e a espessura podem influenciar na resistência e módulos ao cisalhamento transversal. Os autores ainda afirmaram que devido ao desdobro, as lamelas mais largas apresentam maior quantidade de anéis anuais orientados radialmente nas zonas periféricas, levando a valores mais elevados do módulo de cisalhamento ao rolamento. Os autores também observaram que quando a razão b/h (largura/espessura) foi menor que 4, a resistência e o módulo do cisalhamento de rolamento foram 40% e 30%, menores respectivamente, corroborando com a afirmação de Brandner *et al.* (2017) sobre a diminuição da resistência dos painéis.

Adicionalmente, constatou-se em pesquisas que os lenhos juvenil e adulto influenciam na densidade da madeira, estabilidade dimensional,

resistência e rigidez de propriedades mecânicas, larguras dos anéis de crescimento. Estas características, juntas, influenciam na qualidade da madeira. Em pesquisas preliminares observa-se que madeiras com alta quantidade de lenho juvenil apresentam propriedades mecânicas menores que madeiras com lenho adulto (VIDAURRE *et al.*, 2011). A densidade também apresenta uma tendência de aumento na direção radial (BENDSTEN, 1978).

Normalmente, as pesquisas de MLCC consideram apenas a classe de resistência da tábua classificada dentro de uma norma. Por isso, nem sempre a idade da matéria-prima é declarada em estudos de painéis MLCC. Até o momento, desconhecem-se estudos que tragam informações sobre os lenhos juvenil e adulto presentes nos painéis.

6.6.2 Variáveis inerentes à produção

Embora pesquisas prévias indiquem que o MLCC apresenta alto rendimento mecânico, estudos que investiguem os efeitos dos diferentes parâmetros de produção no desempenho ainda são escassos. No entanto, sabe-se que a classe de resistência da madeira, o tipo de adesivo e gramatura e o tempo e pressão de colagem podem afetar a performance dos painéis.

Com relação às classes de resistência, tem-se que o painel MLCC deve ser produzido com madeiras cujas classes apresentem valores mínimos determinados por normas para segurança da construção. Pela norma europeia EN 338 (EN, 2016) o valor mínimo exigido do MOE à flexão em uma tábua para uso estrutural é de 7.000 MPa. Na norma brasileira NBR 7190 – 2 (ABNT, 2022b) o valor para coníferas é de 5.000 MPa. Por se tratar de um produto estrutural, a qualidade da matéria-prima é um fator de suma importância, sendo que se preza para que esses valores sejam atendidos pelos fabricantes.

Contudo, os fabricantes de MLCC dependem da matéria-prima disponível no mercado. Isso foi evidenciado por Leite, Sánchez e Blumenschein (2018) que ao avaliar a processo produtivo para implantação da produção dos painéis no Brasil, concluíram que boa parte da matéria-prima ofertada para esse fim ainda não apresenta qualidade apropriada para gerar componentes para construção civil.

Um dos fatores que impacta nesse quesito, está relacionado às rotações curtas que proporcionam toras com menor área de lenho adulto, levando a menores classes de resistência das lamelas disponibilizadas no mercado (ZOBEL; SPRAGUE, 1998; MALAN, 2010; WESSELS *et al.*, 2015; MUSTEGA *et al.*, 2019).

Além da influência das classes de resistência, atenta-se aos adesivos produzidos para fins estruturais. Os adesivos indicados para a colagem de painéis com fins estruturais são o fenol formaldeído, resorcinol formaldeído, fenol resorcinol formaldeído, melamina formaldeído, isocianato, melamina ureia – formaldeído, epoxi e poliuretano. Para a escolha do adesivo mais apropriado devem ser considerados fatores como resistência, durabilidade, umedecimento, tempo de cura, consistência, mistura ou não de componentes e a classe de uso final do painel (FRIHART; HUNT, 2010).

O adesivo mais utilizado no mundo para a manufatura de MLCC é o adesivo a base de poliuretano. Por não precisar de mistura, é um adesivo considerado de fácil aplicação na indústria, com bons resultados do desempenho dos painéis. O adesivo apresenta uma linha de cola indistinta, pode ser aplicado diretamente na madeira e a cura ocorre em temperatura ambiente. A gramatura utilizada normalmente segue as especificações orientadas pelo fabricante do adesivo, mas pode variar de 200 a 250 g.m⁻². Estudos que avaliem a possibilidade de diminuir ou aumentar a gramatura do adesivo não foram encontrados até o momento desta pesquisa.

A gramatura, o tempo e a pressão de colagem são normalmente estipulados conforme o fabricante do adesivo. Porém, podem ocorrer variações devido às temperaturas e umidade relativas de cada região e estação do ano. Na Tabela 37 estão ilustradas algumas recomendações para a gramatura, tempo de colagem e pressão conforme as fichas técnicas emitidas por alguns fabricantes.

Tabela 37 - Exemplos de tempo, gramatura e pressão de colagem para adesivos usados na produção do MLCC.

Adesivo	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Gramatura (g.m⁻²)	Pressão (MPa)
PUR Kleiberit® 510.0	20	240	200 - 300	Mínimo 0,6
RP 2708 Collano®	18 - 30	≥ 20	140 - 200	0,6 - 1,0
RP 2730 Collano®		≥ 75		
RP 2760 Collano®		≥ 150		
1C PUR 681.60 Jowapur®		≥ 100	140 - 200	
1C PUR 681.30 Jowapur®	20	≥ 45	150 - 200	0,6 - 1,0
1C PUR 681.60 Jowapur®		≥ 135	150 - 200	

Fonte: A autora (2023).

O adesivo mono-componente a base de poliuretano é o mais usado por produtores de MLCC, principalmente pela praticidade. Normalmente ele cura em temperatura ambiente. O adesivo apresenta duração suficiente para ser usado em espécies de baixa densidade. Adicionalmente, o poliuretano é reativo com a umidade do ar e da superfície. Como é menos susceptível a menores umidades, a madeira não precisa apresentar baixos teores de umidade. Como ele apresenta alta resistência tanto na madeira seca como na úmida, resistência à água e preenchimento de eventuais lacunas na madeira por ser expansível é um adesivo muito utilizado por produtores de elementos estruturais, sendo considerado o adesivo mais durável para usar em produtos destinados a construções (FRIHART; HUNT, 2010).

Em pesquisa sobre alguns parâmetros de manufatura de MLCC, Sharifnia e Hindman (2017) concluíram que para o adesivo a base de poliuretano, o aumento da pressão e tempo de prensagem influenciaram em um menor cisalhamento quando a umidade da madeira estava mais alta. Os autores indicaram que esses fatores podem afetar na quantidade de adesivo espreado da linha de cola durante a prensagem, bem como a cura precoce do

adesivo se houver uma alta umidade, ocasionando pouca penetração na madeira.

6.7 REGULAMENTAÇÕES E NORMAS ATUAIS

Como o MLCC é um produto relativamente novo no mercado mundial, ainda há poucas normas que regulamentam o seu desempenho e cálculo para estruturas.

Recentemente, a ABNT publicou a nova norma para estruturas de madeira, a NBR 7190 – 7 (ABNT, 2022c), que contempla as etapas para normalização dos testes para o MLCC, embora, a norma não abranja valores de desempenho dos painéis. O mesmo ocorre com as normas europeias de MLCC. A norma europeia EN 16351 (EN, 2015) traz recomendações de produção e testes, enquanto as Aprovações Técnicas Europeias (ETA) certificam a qualidade declarada do painel para cada empresa.

6.7.1 NBR 7190

A nova norma brasileira para estruturas em madeira, publicada em julho de 2022, contempla sete partes. Dentre essas, a parte 2 aborda os critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais. Nesta parte, no Anexo A, encontram-se os requisitos que as lamelas de *Pinus* spp. devem conter para serem utilizadas em painéis MLCC.

Na parte 7, são abordados os métodos de ensaio para os painéis MLCC. Dentre eles as especificações do número de corpos de prova em função da largura do painel, métodos de ensaio para determinar as propriedades de resistência e rigidez para carregamentos paralelo e perpendicular ao plano do painel e cisalhamento da linha de cola e de rolamento do painel.

6.7.2 EN 16351

A norma europeia EN 16351 (EN, 2015) intitulada “*Timber structures – Cross laminated timber: requirements*” aborda os requerimentos de produção e

testes de painéis MLCC produzidos com espécies de coníferas, cujas lamelas tenham sido classificadas visual e mecanicamente, que apresentem pelo menos três camadas e com espessura total de até 500 mm, entre outras recomendações.

Conforme a norma, as lamelas devem ser classificadas nas classes de resistência presentes na EN 338 (EN, 2016), pelo módulo de elasticidade à flexão ou pela tração paralela às fibras. O adesivo utilizado deve ser declarado pelo produtor, como os adesivos formaldeídos (MUF, UF), adesivos mono-componentes como a base de poliuretano (PUR) e adesivos de isocianato de polímero de emulsão. Cada um dos tipos de adesivo segue premissas estipuladas pela norma para seu uso e cura.

As características do painel MLCC devem ser obtidas por meio de testes ou com as características determinadas com base nos componentes (lamelas) e declaradas em conformidade.

A geometria, colagem e outras características dos *finger-joints* utilizados na união das lamelas também estão presentes na norma.

Com relação aos possíveis sulcos presentes do painel devido ao processo de fabricação, a norma estipula que o sulco tenha uma profundidade máxima de 90% em relação à espessura da camada e no máximo 4 mm de largura. As lamelas adjacentes podem ser coladas ou não na face estreita e a largura das folgas entre as lamelas dentro de uma camada deve ser menor ou igual a 6 mm.

A avaliação da resistência e rigidez dos painéis por meio de testes deve seguir as premissas do Anexo F, presente na mesma norma.

A norma ainda traz as premissas para reação ao fogo, liberação de substâncias tóxicas, durabilidade da linha de cola, durabilidade contra agentes biológicos e informações da produção que devem ser declaradas pelo produtor.

Contudo, valores de referência do desempenho do painel para cálculo de projetos ainda não estão presentes na norma. Para tal referência, cada produtor possui uma Declaração de Desempenho do Produto (*Declaration of Performance – DoP*), regulamentado pelo Documento de Avaliação Europeu (*European Assessment Document – EAD*) por meio das Avaliações Técnicas Europeias (*European Technical Assessment – ETA*).

6.7.3 *European Assessment Document e European Technical Approval*

Colocar o MLCC como produto de construção no mercado europeu requer uma certificação (Certificate European – CE). Desde que o regulamento dos Produtos de Construção (*Construction Products regulation – CPR*) entrou em vigor em meados de 2013, essa certificação pode ser alcançada produzindo painéis de acordo com um padrão do produto em que é avaliado por uma ETA. Em ambos os casos um DoP e nome do produtor é obrigatório. Isto garante ao usuário a homogeneidade de desempenho e conformidade do painel com as propriedades declaradas pelo produtor. Como a norma europeia, EN 16351, do produto MLCC não está completamente acurada, até o momento, a certificação CE via ETA permanece (EAD, 2015; EOTA, 2019; FINK *et al.*, 2018).

O processo de emissão da ETA para o MLCC é regulamentado pelo Documento de Avaliação Europeu – EAD 130005-00-0304. Ele contém além da definição e uso pretendido, informações detalhadas para determinar as propriedades físicas e mecânicas dos elementos MLCC com base em testes de desempenho e regulamentos para os requisitos que serão declarados (EAD, 2015; FINK *et al.*, 2018).

O EAD 130005-00-0304 (EAD, 2015) se baseia em diversas normas europeias para fixar os parâmetros de produtos para a construção civil que ainda não possuem normas específicas para tal. Na Tabela 38 estão algumas das propriedades das lamelas e dos painéis de empresas que possuem o *European Technical Assessment* - ETA para comercialização dos painéis MLCC na União Europeia.

Tabela 38 – Exemplos de certificações técnicas (ETA) emitidas para empresas produtoras de MLCC na Europa relacionadas as classes de resistência das lamelas e/ou dos painéis.

		Empresa (Número da ETA)					
		Xlam Dolomiti (12/0347, 2017)	Schilliger Holz- industrie AG (08/0238, 2018)	W.u.J Derix Xlam (11/0189, 2019)	KLH Massivholz (06/0138, 2017)	Stora Enso (14/0349, 2019)	Gaujas Koks LTD. (16/0115, 2018)
Cidade - País		Castel Ivano, Itália	Kuessnacht, Suíça	Westerkapp- eln, Alemanha	Teufenbach- Katsch, Áustria	Helsinki, Finlândia	Jekapils, Letônia
Classe	EN 338	C24	≥C16	≥C16	C24	C16 C24 C30	C24
ρ_m	kg.m ⁻³	420	400	420			
MOE	KPa	11	11,5	11	12	8 12 12	
$E_{90,m}$		370	390	370	370		
$G_{,m}$		690	650	690	690	- 460 460	Propriedad es baseadas nas lamelas pelas classes de resistência da EN 338
$F_{m,k}$		24	24	24	24	17,6 26,4 33	
$F_{t,o,k}$	MPa	14	16,5	14,5	16,5		
$F_{t,90,k}$		0,4	0,4	0,4	0,12	0,12 0,12 0,12	
$F_{c,o,k}$		21	24	21	24		
$F_{c,90,k}$		2,5	2,5	2,5	2,7		
$F_{v,k}$		4	4	2,7	2,7		
Camada - espessur a		3 19 19 19	3 20 20 20	3 20 20 20	3 a 16 10 a 45	3 a 20 14 a 45	3 ou 5 10 a 45

ρ_m – densidade média do painel; MOE – Módulo de elasticidade médio paralelo a grã das tábuas; $E_{90,m}$ - Módulo de elasticidade médio perpendicular a grã das lamelas $G_{,m}$ – Módulo de cisalhamento paralelo a grã das tábuas; $F_{m,k}$ – resistência a flexão paralela a grã; $F_{t,o,k}$ - resistência a tração paralela a grã; $F_{t,90,k}$ - resistência a tração perpendicular a grã; $F_{c,o,k}$ - resistência a compressão paralela a grã; $F_{c,90,k}$ - resistência a compressão perpendicular a grã; $F_{v,k}$ - resistência ao cisalhamento paralelo a grã.

Fonte: A autora (2023).

6.7.4 Avaliação da qualidade de MLCC pelo EAD

A Organização Europeia de Avaliação Técnica – EOTA, fornece a avaliação do painel aos fabricantes interessados em obter a comprovação da qualidade. Todas as características e aspectos relevantes para comercialização do produto são avaliados, entre eles: desempenho, embalagem, armazenamento, transporte, instalação e manutenção (EOTA,

2019). Os documentos são baseados em conhecimentos técnicos e científicos obtidos até a data de publicação do material (EAD, 2015).

Para o desempenho do MLCC, o documento EAD 130005-00-0304, intitulado, *Solid wood slab element to be used as structural element in buildings*, prevê a avaliação da:

- Resistência e rigidez à flexão conforme a norma EN 408;
- Tração e compressão classificadas pela EN 338;
- Cisalhamento pela EN 408 em teste de flexão estática à quatro pontos;

- Duração do carregamento com especificações do k_{mod} (fator de modificação para o fator de carga e teor de umidade) e k_{def} (fator de deformação) conforme o uso do material, duração da carga e classe de serviço. Os valores do k_{mod} e k_{def} são especificados na EN 1995-1-1.

- Estabilidade dimensional. Prevê que a manufatura do painel tenha mínimos desvios das dimensões, a fim de não comprometer a estabilidade dimensional. As dimensões das lamelas utilizadas e do painel final devem ser declaradas pelo fabricante.

- O teor de umidade também deve ter mínimos desvios para evitar possíveis deformações dos painéis.

- As classes de serviço sob as condições que o painel será utilizado também devem ser declaradas pelo fabricante. As classes de serviço seguem a EN 1995-1-1 (EN, 2004).

- Segurança em caso de incêndio, o produto deve apresentar os requerimentos mínimos sobre a reação e resistência ao fogo.

- Higiene, saúde e ambiente. O painel não deve apresentar liberação de substâncias estranhas e/ou nocivas.

- Condutividade. O painel ainda pode ser avaliado quanto a: absorção de sons, ar, água, insolação, bem como, a condutividade e inércia térmica.

Para obter a certificação do produto, o fabricante deve controlar constantemente os fatores de produção: comprovar a resistência de *finger joints* (se houver); colagem do painel e dimensões.

6.8 SITUAÇÃO ATUAL PARA A CIÊNCIA E INDÚSTRIA

Os painéis MLCC ainda são considerados um produto novo no mercado. Observa-se um esforço internacional da ciência para determinar as diversas propriedades físico-mecânicas dos painéis, de modo a se ter um nível de dados suficientes para basear as normas de padronização. Embora ao nível mundial haja inúmeras pesquisas, a maioria das espécies utilizadas nesses estudos apresentam crescimento diferenciado das espécies comerciais de rápido crescimento brasileiras. Considerando a vastidão do tema e da sua recente importância, as pesquisas atrelando os painéis com a matéria-prima brasileira ainda são escassas. Adicionalmente, faz-se necessário pesquisas que sirvam de bases de dados para as futuras normas nacionais de padronização do produto, e consequentemente, para as normas internacionais, visando a exportação desse material para o mercado externo.

Mesmo as normas mundiais, ainda necessitam determinar informações para este produto, como exemplo, temos a regularização dos métodos de testes e os cálculos para execução de projetos (BRANDNER *et al.*, 2016). Por isso, inúmeras pesquisas têm sido realizadas nos últimos anos, visando determinar a atual situação do painel, bem como, as necessidades para regularizar a aplicação do produto no sistema construtivo, compreender as características dos painéis, melhorar e avaliar o seu desempenho em diferentes áreas de aplicação (VESSBY *et al.*, 2009; GÜLZOW; RICHTER; STEIGER, 2011; ESPINOZA *et al.*, 2016; SCHMID *et al.*, 2018).

Em uma pesquisa abordando aspectos gerais para a implementação do MLCC nas normas europeias, Fink *et al.* (2018) discutiram as diferenças entre os corpos de prova para os testes de resistência e os corpos de prova em tamanho natural, painéis estruturais. Os autores ainda declararam as incertezas relacionadas ao procedimento de produção do MLCC e ao procedimento de testes não padronizados. No estudo de caso abordado, os autores notaram grande variação entre as diferentes séries de produção de diversos produtores na Europa. Mas concluíram que a possibilidade de um fator de segurança para os cálculos de projeto feitos em MLCC, pode ser menor do que o atualmente usado, baseado no fator de segurança da MLC.

No Brasil, as pesquisas com MLCC estão começando. Leite, Sánchez e Blumenschein (2018), caracterizaram e analisaram o processo produtivo do MLCC para implementação no mercado brasileiro. Os autores consideraram aspectos como a quantidade de florestas plantadas, a qualidade da madeira serrada para a produção do produto, a localização dos polos produtores, bem como as características dos painéis e o processo para produção. Conforme os autores, uma das conclusões foi que apesar da expressiva vocação florestal, boa parte da matéria-prima ofertada para esse fim ainda não apresenta qualidade apropriada para gerar componentes para construção civil.

Terezo *et al.* (2020) analisaram os custos de produção do painel MLCC fabricado em laboratório e compararam com os custos de materiais convencionais utilizados na construção civil, alvenaria estrutural e alvenaria de vedação. O MLCC, nesse estudo, teve aproximadamente um custo 37% menor que a alvenaria de vedação e 18,5% menor que a alvenaria estrutural, indicando um grande potencial para sua produção na região do estudo (Lages, Santa Catarina).

Passarelli (2013), em sua dissertação, avaliou e comparou a possibilidade de produção dos painéis no Estado de São Paulo para a madeira de eucalipto, baseando-se em modelos produtivos de empresas já consolidadas na Áustria. O autor concluiu que mesmo que a taxa de incremento anual no Estado de São Paulo seja 4 a 6 vezes superior às florestas austríacas, a maioria das toras brasileiras são destinados para produtos de baixo valor agregado, como a indústria de papel e celulose. Enquanto na Áustria, um maior volume de toras de madeira é destinado para o processamento em serraria ou indústria de laminados, visando sempre a fabricação de produtos com alto valor agregado.

Ressalta-se que a maior taxa de incremento no Estado de São Paulo, mencionado por Passarelli (2013), bem como espécies diferentes, leva a características mecânicas distintas das madeiras austríacas utilizadas na serraria e indústria de painéis. Como já mencionado na primeira parte desse estudo, as altas taxas de crescimento podem resultar em maiores proporções de lenho juvenil e consequentemente menores propriedades mecânicas. Isso pode levar a necessidade de estudos que avaliem a quantidade de lenho juvenil presente nas lamelas que compõem os painéis MLCC no Brasil.

Em um estudo publicado avaliando as propriedades mecânicas dos painéis, Vilela e Mascia (2021) levantaram a discussão da variabilidade da matéria-prima utilizada na produção dos painéis. Os autores comentaram que como a madeira de *Pinus taeda* utilizada atualmente na indústria provém de diversas regiões do país e tem diferentes propriedades, e que por esse motivo, é importante verificar a normalidade de suas propriedades mecânicas. Outro aspecto comentado pelos autores, foi inerente a impossibilidade de se estabelecer a compatibilidade dos eixos radial (R) e tangencial (T) da madeira com uma única direção no MLCC. Isso, devido ao tamanho das lamelas frente ao da seção transversal do tronco, e que por conta disso, determinam-se os valores característicos, garantindo a segurança dos cálculos de projeto.

As pesquisas mencionadas acima concluem que existe a viabilidade da utilização do painel MLCC no país, bem como sua produção. Porém, as florestas brasileiras possuem grande variabilidade, resultando em diferenças nas propriedades mecânicas. Deste modo, estudos para compreender as relações da colagem da madeira e linha de cola, capacidade de carga do painel em função da espécie e da espessura das lamelas de madeira precisam ser realizados.

6.9 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DO MLCC

As propriedades básicas avaliadas pelas normas e nos documentos de aprovação técnica para a maioria dos produtores de painel são basicamente: a densidade, o módulo e resistência à flexão perpendicular e paralela ao plano, o cisalhamento de rolamento, a resistência à tração paralela e perpendicular às fibras e a resistência e módulo à compressão.

Essas propriedades podem ser declaradas de duas formas. A primeira é com base em ensaios laboratoriais com amostragem dos painéis fabricados. Na segunda, é com base nas propriedades das lamelas individuais utilizadas para fabricar o painel, conforme as classes de resistência da norma europeia EN 338 (BRANDNER *et al.*, 2016).

Devido ao painel MLCC ser um produto novo no mercado, muitas propriedades mecânicas não são reguladas por normativas quanto aos ensaios e valores mínimos de desempenho. Mesmo com as divergências entre estudos

em diferentes configurações de teste, existe muita informação sobre o desempenho de diferentes painéis.

Pode-se observar que o desempenho do painel pode mudar conforme a espécie da madeira, adesivo, espessura das camadas, padrão de serragem, presença de nós, relação largura e espessura das tábuas, colagem da face lateral das tábuas, classes de resistência das tábuas, etc. (GÜLZOW; RICHTER; STEIGER, 2011; BRANDNER *et al.*, 2017; LI, 2017; BRANDNER, 2018; BAÑO *et al.*, 2018; FINK *et al.*, 2018; CAO *et al.*, 2019). Isso aponta a importância das propriedades mecânicas dos painéis, já que são os valores nas diferentes propriedades que ditam o melhor uso do painel para determinado serviço. Além de que, esses valores são indicativos da qualidade e sendo base para os cálculos de projeto.

Vários estudos publicados determinaram as propriedades mecânicas, de painéis com três, cinco ou mais camadas, manufaturados na indústria ou no laboratório. Nos próximos tópicos serão abordados os resultados obtidos em alguns desses estudos.

6.10 RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA FLEXÃO

Ensaio de flexão realizados em painéis são úteis para painéis utilizados como pisos principalmente com grandes vãos entre apoios.

Os testes de flexão estática podem ser executados em painéis de dimensões estruturais ou em corpos de prova cortados dos painéis. Normalmente em testes de painéis de tamanho estrutural, os MLCC são levados até a ruptura. Mas devido as grandes dimensões do painel, são necessárias máquinas de ensaio com grande capacidade de carga. Devido à onerosidade das máquinas de ensaio, pode-se observar valores de resistência à flexão associado a corpos de prova extraídos de painéis. De forma geral, o teste de flexão estática em painéis é de fácil realização, sendo um dos testes mais comuns e mais aplicados em estudos para avaliar painéis.

Kramer, Barbosa e Sinha (2014) estudaram o potencial de espécies de baixa densidade para a produção de painéis MLCC com base em corpos de prova extraídos de painéis. Os painéis (n=7) foram manufaturadas com 3 camadas em laboratório, com espessura total de 96 mm. Os autores avaliaram

a rigidez e a resistência à flexão, resultando em médias de 7.359 e 26 MPa, respectivamente. Somado aos ensaios, os autores ainda avaliaram os tipos de ruptura, constatando que a maioria rompeu pela combinação das forças de flexão e cisalhamento. Os autores ainda levantaram o ponto em que madeiras de baixa densidade apresentam potencial para o uso em painéis, de modo a atender os requerimentos de normas como a ANSI/APA PRG-320 (APA, 2020) e EN 338 (EN, 2016).

Hindman e Buildin (2015) estudaram as propriedades mecânicas de painéis feitos com espécies nativas dos Estados Unidos, conhecidas como *Southern pines*. Os painéis de 5 camadas foram produzidos em laboratório e colados com adesivo a base de poliuretano. Os resultados obtidos por corpos de prova indicaram que a resistência e o módulo de elasticidade à flexão, 102 MPa e 4.110 MPa, respectivamente, apresentaram valores superiores aos mínimos requeridos pela normativa ANSI PRG-320 (*The Engineered Wood Association* – APA/ANSI (APA, 2020). Os autores ainda mencionaram que existe um potencial das espécies *Southern pines* para o uso em painéis MLCC, mesmo que ainda não seja as espécies utilizadas nas fábricas já existentes nos EUA.

Fink *et al.* (2018) analisaram a resistência e rigidez à flexão em cinco diferentes produtores da Europa que buscaram a aprovação ETA. Os autores determinaram as resistências e rigidezes com base em corpos de prova extraídos de painéis. Os resultados para a $f_{m,k}$ foram entre 24 e 28,8 MPa, com a maioria dos painéis com média de 26,4 MPa. O MOE teve valores entre 11.000 e 12.500 MPa.

Sikora *et al.* (2016) ao estudarem painéis de três e cinco camadas fabricados com *Picea* sp. da Irlanda, afirmaram que a resistência à flexão não tem um aumento considerável ao aumentar da espessura do painel. No entanto, os autores mencionaram a importância de mais estudos para validar essa hipótese.

No Brasil, estudos com painéis MLCC são recentes, mas já existem bons resultados sobre a qualidade e desempenho dos painéis manufaturados com espécies de reflorestamento no Brasil.

Lucena *et al.* (2019) avaliaram painéis de três camadas de *Pinus taeda* com madeira procedente do Estado de Santa Catarina. Os painéis tinham 15

mm de espessura por camada, totalizando uma espessura de 45 mm e a distribuição das lamelas ocorreu de forma sistematizada. As duas camadas externas tiveram MOE maiores do que na camada interna, composta por lamelas de menor MOE. O MOE médio foi de 10.688 MPa e a propriedade variou de 9.213 a 13.330 MPa entre os cinco painéis estudados.

Pereira e Calil Junior (2019) fizeram um estudo comparando dois tipos de painéis MLCC produzidos em laboratório em tamanho estrutural. Os autores avaliaram a espécie de *Pinus taeda* com o adesivo melamina ureia - formaldeído, cinco camadas com espessura de 16 mm cada, totalizando 80 mm de altura. Com a espécie *Eucalyptus urograndis* os painéis foram manufaturados com adesivo poliuretano, com 3 camadas, cuja espessura foi de 32 mm por camada, totalizando 96 mm de altura. Os painéis de *Pinus taeda* resultaram em um MOE médio de 5.400 MPa, quando comparado ao do Eucalipto com MOE médio de 11.740 MPa, contudo os autores não trouxeram informações sobre a idade das madeiras e densidade.

Vilela e Mascia (2021) caracterizaram painéis MLCC de *Pinus taeda*, cuja fabricação considerou o posicionamento de lamelas com os maiores valores de rigidez nas camadas externas e as de menor nas camadas internas. Os autores extraíram corpos de prova de painéis com 160 mm de espessura para determinar as propriedades mecânicas. Os valores médios para as propriedades avaliadas foram de 78,2 MPa na resistência a flexão, módulo de elasticidade à flexão de 14.029 MPa. A densidade média aparente declarada pelos autores com base nos corpos de prova supramencionados foi de aproximadamente 595 kg·m⁻³. De modo geral, os autores afirmaram que os resultados médios obtidos foram maiores e estatisticamente diferentes aos da literatura consultada.

6.11 RESISTÊNCIA E RIGIDEZ À COMPRESSÃO

Dado que a construção de edifícios altos de madeira está se intensificando no mundo e que o MLCC é um dos produtos usados na construção desses edifícios, é importante conhecer suas propriedades. Muitas vezes os painéis MLCC são empregados como paredes estruturais, portanto,

torna-se imprescindível o conhecimento da resposta estrutural dos painéis às cargas de compressão no plano do painel (PINA; FLORES; SAAVECHA, 2019; WEI *et al.*, 2019).

Algumas propriedades mostram uma dependência considerável do tipo de configuração do painel, em particular a relação existente entre a espessura da camada longitudinal e a transversal. Dentre essas propriedades nota-se que a compressão paralela à grã é dependente apenas das camadas cuja direção seja paralela à grã (BRANDNER *et al.*, 2016). Os autores comentaram com base em diversos estudos, que as verificações das tensões no plano consideram apenas a área transversal líquida do painel, ou seja, as camadas na direção das tensões aplicadas. Isso significa que as tensões mínimas transferidas pelas camadas transversais são desprezadas.

Considerando as peculiaridades do painel MLCC, estudos têm sido desenvolvidos para compreender o seu comportamento sob cargas de compressão. Wei *et al.* (2019) avaliaram o MLCC de *western hemlock* sob forças de compressão. Dentre os resultados, eles observaram que os corpos de prova de compressão exibiram rupturas complexas. Os autores observaram quatro diferentes modos de ruptura: ruptura por cisalhamento oblíquo, ruptura por divisão longitudinal, esmagamento e rachaduras nas extremidades e rachaduras nas juntas de madeira.

He *et al.* (2020) avaliaram corpos de prova extraídos de painéis MLCC de *black spruce*, com três e cinco camadas e constataram que a resistência a compressão aumenta levemente com o aumento da espessura do painel. Os valores médios para a resistência a compressão foi de 21,1 MPa com coeficiente de variação de 6,7% e módulo a compressão de 7.614 MPa, para os painéis de três camadas produzidos com *Sitka spruce* proveniente do Canadá, com densidade média de 490 kg.m⁻³.

Vilela e Mascia (2021) em uma pesquisa com painéis de *Pinus taeda* de cinco camadas com 160 mm de espessura, obtiveram valores médios de 47,5 MPa para a resistência e 18.828 MPa para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras. Os autores afirmaram que os resultados foram maiores e estatisticamente diferentes aos da literatura consultada.

De modo geral, observa-se que os painéis submetidos a forças paralelas ao plano apresentam grandes valores das propriedades. Brandner

(2018) comentou que, sendo a madeira um material anisotrópico cilíndrico, ela é geralmente caracterizada por grandes propriedades de rigidez e resistência paralela à grã, enquanto as propriedades perpendiculares à grã são muito menores.

Quando é exposta à compressão perpendicular às fibras, a madeira se comporta de forma dúctil, apresentando deformações superiores a 10% do tamanho original. Por conta disso, a compressão perpendicular ao plano do painel é uma propriedade que deve ser verificada para todos os produtos utilizados em construções de madeira. Um exemplo sobre a importância dessa propriedade pode ser a área que suporta uma ou mais vigas, ou a construção de estruturas em plataforma (BRANDNER, 2018).

Devido à importância da compressão perpendicular às fibras, Brandner (2018) relatou detalhadamente sobre os atuais estágios de conhecimento da propriedade na madeira sólida e em painéis MLCC. Um dos principais pontos abordados foi o quanto a propriedade é dependente da configuração de carregamento. Devido à falta de normativa para a propriedade em painéis MLCC, o autor indicou que a geometria dos testes para painéis deve abranger toda a espessura do painel. No estudo, os autores avaliaram um painel de 5 camadas com 160 mm de espessura e as geometrias de 150 × 150 mm e 100 × 100 mm. Também foi recomendado que os corpos de prova sejam retirados arbitrariamente, e que defeitos intrínsecos da madeira e do painel sejam amostrados, tais como nós e rachaduras (relativos à madeira) e lacunas ou falhas (relativos à produção do painel). As influências relativas às lamelas que compõem uma camada e os tipos de orientação de anéis e tipos de corte (tangencial e radial) também devem ser considerados no momento da amostragem.

Os valores de resistência média da $f_{c,90}$ para os corpos de prova de 100 × 100 mm foi de 3,26 MPa com um c.v. de 5,4%. Já para os corpos de prova de 150 × 150 mm uma resistência média de 3,48 MPa e c.v. de 6,8% foi observado pelo autor. Com esses resultados, o autor sugeriu que a deformação fosse medida na totalidade da espessura dos corpos de prova, uma vez que a maioria das deformações ocorre nas zonas adjacentes às áreas de contato e que ao medir apenas na parte central superestimaria a rigidez.

Pode-se observar com os estudos exemplificados acima, que há uma grande variedade de metodologias de ensaio e cálculo para determinar as propriedades. A maior variação entre os estudos é que a geometria dos corpos de prova e a velocidade de aplicação de carga durante o ensaio. No entanto, ainda não se pode determinar com base na literatura qual melhor método a ser utilizado, visto que ainda não há valores de referência normatizados.

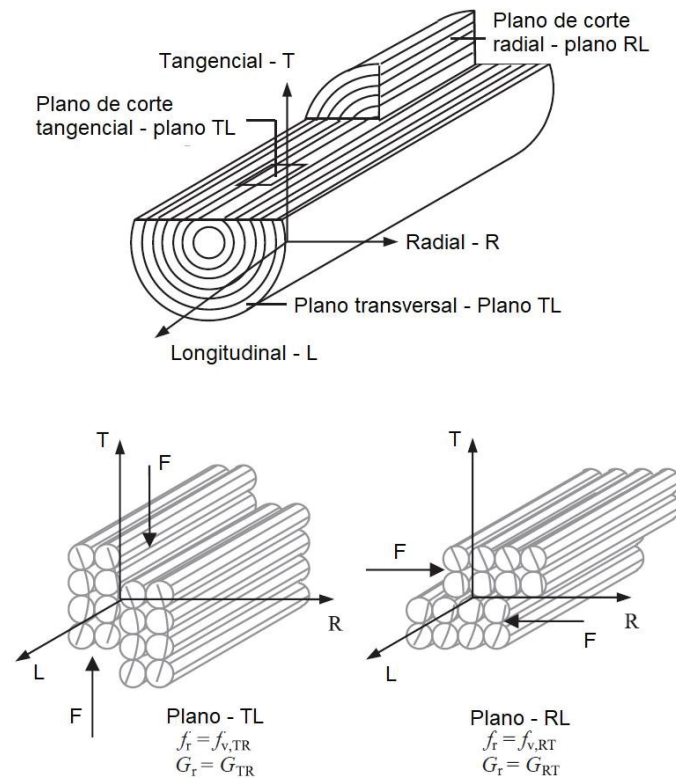
6.12 CISALHAMENTO DE ROLAMENTO

Os ensaios de cisalhamento são importantes por indicar a capacidade de um painel ser usado como piso. Li (2017) aborda que pisos MLCC suportados por pilares apresentam cargas altamente concentradas, e podem ocorrer zonas críticas de cisalhamento de rolamento nas áreas de apoio. As altas cargas de flexão em pisos MLCC de vãos curtos também podem causar altas tensões de cisalhamento de rolamento. O cisalhamento por rolamento também é significativo durante a construção, pois altas tensões de cisalhamento de rolamento podem ocorrer próximos dos pontos de ancoragem de içamento dos painéis.

O cisalhamento de rolamento (*rolling shear*, do inglês) é o efeito de rolar as fibras da madeira ao redor das mesmas, quando submetidas a tensões tangenciais (Figura 39). Esse efeito não é comum em elementos de madeira serrada, como vigas ou pilares, pois nestes a direção principal dos esforços coincide com a direção das fibras da madeira (VILELA, 2020). No entanto, em elemento de placas de madeira, como os painéis MLCC, pode haver mais de um esforço interno ou há a combinação de elementos dispostos de tal forma que gera o cisalhamento de rolamento.

O cisalhamento de rolamento se torna mais notável no MLCC devido à natureza anisotrópica da madeira e a montagem ortogonal do painel. O cisalhamento normalmente ocorre na camada cruzada devido aos carregamentos à flexão perpendiculares ao plano do painel, sendo o resultado das tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial perpendicular às fibras da camada cruzada (HOSSEINZADEH; MOHEBBY; ELYASI, 2020).

Figura 39 - Esforços que produzem o cisalhamento de rolamento.



Fonte: Adaptado de Eberhardt e Brander (2018).

A influência de parâmetros relacionados a serragem no cisalhamento de rolamento foi abordada por Ehrhart *et al.*, (2015). Os autores estudaram a distância da tábua em relação à medula da tora e o padrão de serragem, sendo que o padrão foi determinado pela razão entre a largura e a espessura da tábua. Os resultados sugeriram que, ao contrário do esperado, o cisalhamento de rolamento não aumenta com a maior distância da medula, ou seja, com a menor espessura dos anéis de crescimento. Com a influência do padrão de serragem foi constatado que devido ao comportamento de distribuição de tensões do cisalhamento de rolamento, quanto menor a razão entre a largura e a espessura (b/h) maior serão os picos de tensões e maior será a lacuna entre as tensões reais e calculadas. Dessa forma, quanto menor a razão menor será a resistência calculada do cisalhamento de rolamento. Por esse motivo, a atual norma europeia EN 16351 (EN, 2015) propõe que a razão entre a largura e a espessura das lamelas seja igual ou maior que 4. Deste modo, a influência do cisalhamento de rolamento é reduzida, principalmente nas camadas carregadas fora do plano.

De acordo com Ehrhart *et al.* (2015), Ehrhart e Brandner (2018) e Cao *et al.* (2019), no MLCC é inválido supor que as seções transversais das camadas do painel sejam exatamente perpendiculares ao eixo neutro sob cargas fora do plano. Isso é muito mais proeminente em condições de flexão de vãos curtos com relação vão/espessura entre 5 a 6h. Nessa condição, a tensão de cisalhamento transversal governa a falha estrutural e a contribuição das deformações por cisalhamento em camadas transversais em relação à deformação total se torna significativa. Em vigas ou pisos submetidos ao momento fletor, o eixo neutro é submetido à maior resistência ao cisalhamento. Isso se torna mais evidente em painéis de três camadas, cuja camada central (cruzada) é submetida à maior resistência ao cisalhamento. Portanto, o conhecimento do módulo e resistência ao cisalhamento de rolamento é de extrema importância para um projeto adequado de estruturas em MLCC.

Em razão da importância do cisalhamento de rolamento em painéis MLCC, estudos foram conduzidos ao longo dos anos para determinar seu valor médio e influência. Em um estudo de caso com painéis de cinco diferentes produtores na Europa, Fink *et al.* (2018) analisaram o cisalhamento de rolamento ($f_{r,k}$), e resultaram em uma faixa entre 0,8 a 1,25 MPa.

Ehrhart *et al.* (2015) estudaram espécies de folhosas e coníferas europeias utilizadas como madeira estrutural. Os testes foram realizados com base na EN 408 utilizando pratos de aço. Os resultados médios variaram de 1,88 a 5,57 MPa, sendo os valores correspondentes ao abeto (*spruce*) e ao freixo (*ash*), respectivamente. Os pinheiros (*pine*) também foram avaliados pelos autores, e sua resistência média foi de 2,29 MPa.

Sikora *et al.* (2016) analisaram a influência da espessura das camadas na resistência ao cisalhamento. Os autores produziram painéis de três e cinco camadas de *Picea sitchensis*, com lamelas de classe estrutural C16, com MOE médio de 8.160 MPa. Os painéis foram produzidos em laboratório com adesivo estrutural mono-componente PUR e ensaiados à flexão com vão curto para determinar o cisalhamento de rolamento. Eles constataram que a resistência pode ser influenciada pelo aumento da espessura das camadas. Os valores das propriedades variaram de 1,0 a 2,0 MPa.

He *et al.* (2020) estudaram MLCC produzidos com a madeira de *sitka spruce*, cujo MOE médio foi de 10.500 MPa. As resistências médias ao

cisalhamento de rolamento foram de aproximadamente 1,74 e 1,80 MPa, para painéis de três e cinco camadas, respectivamente. No estudo, a resistência foi determinada com base em um teste de flexão de vão curto com carga aplicada no centro do corpo de prova.

Os estudos acima ainda mencionaram que ao aumentar razão entre a largura (b) e a espessura (h) das lamelas (espessura da camada do painel), ocorre um aumento na resistência ao cisalhamento do painel. Isso foi comentado por Brandner *et al.* (2016) que afirmaram que para não ocorrer uma redução da resistência ao cisalhamento de rolamento, uma razão mínima de $b/h = \geq 4$ deve ser considerada. Embora existam diferentes abordagens para determinar a resistência ao cisalhamento, pode-se assumir que a geometria das lamelas e a espécie, apresentam grande influência na propriedade e podem levar variabilidade dos resultados.

7 MATERIAL E MÉTODOS DOS PAINÉIS MLCC

A segunda parte do estudo consistiu em utilizar as lamelas de *Pinus taeda* classificadas na primeira parte, para a manufatura de painéis MLCC. Assim, para compor os tratamentos utilizaram-se as lamelas classificadas mecanicamente pelo MOE. Os painéis foram colados e esquadrejados para realizar o ensaio mecânico no painel em tamanho estrutural para obtenção do MOE. Os ensaios destrutivos para obtenção da resistência e rigidez à flexão, compressão e cisalhamento de rolamento foram executados em corpos de prova. Os passos da metodologia serão explicados detalhadamente nos próximos tópicos e podem ser observados no Apêndice 1.

7.1 Preparo das lamelas

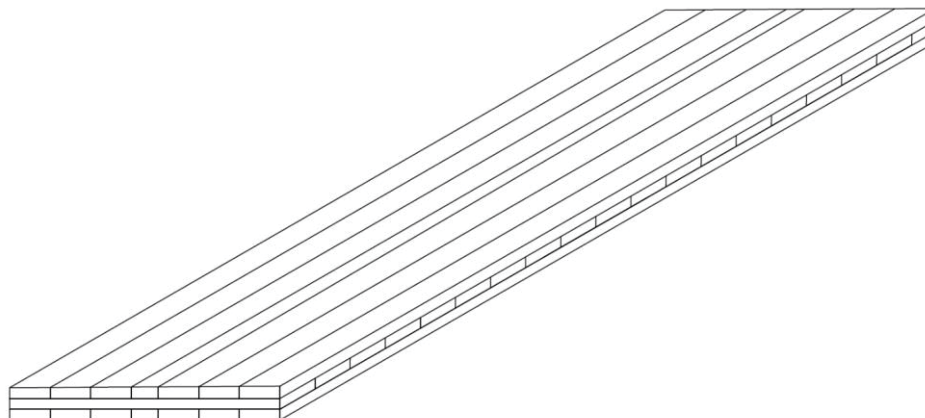
As lamelas utilizadas para a fabricação dos painéis foram classificadas nas classes de resistência determinadas pela norma europeia EN 338 (2016) na primeira parte do estudo. As dimensões prévias às etapas de destopo e plaina foram em média de 26 mm x 147 mm x 3060 mm.

Com base no MOE obtido na classificação mecânica, as lamelas foram separadas em 6 grupos. O grupo não estrutural 1 (NS1) foi composto por lamelas de MOE abaixo de 6.000 MPa. No grupo não estrutural 2 (NS2) o MOE variou entre 6.000 e 7.000 MPa. O grupo estrutural C14, foi composto por lamelas classificadas na classe C14 pela norma europeia, cujo MOE varia de 7.000 a 8.000 MPa. No grupo estrutural C16, o MOE variou de 8.000 a 9.000 MPa. No grupo $\geq$ C18, foram consideradas as lamelas das classes C18, C20 e C22, com o MOE entre 9.000 e 11.000 MPa. Por fim, houve o grupo estrutural $\geq$ C24, formado pelas classes estruturais C24, C27, C30, C35, C40, C45 e C50, cujo MOE é igual ou maior que 11.000 MPa. Esse último grupo foi composto devido ao padrão das fábricas de MLCC na Europa. Com as lamelas separadas por grupos foi sistematizado o delineamento dos tratamentos descritos no próximo item.

7.2 Delineamento dos tratamentos

Neste estudo, 12 painéis, com três camadas, foram montados e colados para avaliar a resistência e rigidez com diferentes configurações das camadas externas e internas. Para cada painel foram necessárias 21 lamelas com comprimentos de 2900 mm. As duas camadas externas contaram com 7 lamelas cada. Para a camada interna foram usadas 20 lamelas de 1000 mm (Figura 40). Em todas as camadas, a espessura foi de $20 \pm 0,3$ mm.

Figura 40 - Esquema do painel MLCC de três camadas.



Fonte: A autora (2023).

O delineamento consistiu em 3 painéis por tratamento, sendo eles:

- Tratamento 1 (T1), todas as camadas foram constituídas aleatoriamente de lamelas do grupo NS1 (sem classe estrutural);
- Tratamento 2 (T2), as camadas externas foram com lamelas do grupo $\geq C24$ e a camada interna com a mistura de lamelas dos grupos C16 e $\geq C18$;
- Tratamento 3 (T3), as camadas externas foram com a mistura de lamelas dos grupos C16 e $\geq C18$ e a camada interna com a mistura de lamelas dos grupos C14 e C16;
- Tratamento 4 (T4), as camadas externas foram com a mistura de lamelas dos grupos C14 e C16, e a camada interna com lamelas do grupo NS2 (não estruturais).

Na Tabela 39 estão indicados os tratamentos com as formas de configuração das camadas e o número de painéis.

Tabela 39 - Delineamento experimental dos painéis MLCC com as classes de resistência baseadas na norma europeia EN 338.

Tratamento	Composição	Número de painéis
T1	Camada Externa (E): NS1 Camada Interna (I): NS1	3
T2¹	E: $\geq$ C24 I: C16 a C22	3
T3¹	E: C16 a C22 I: C14 e C16	3
T4	E: C14 e C16 I: NS2	3

¹ configuração de painéis comerciais de empresas europeias.

Os tratamentos T2 e T3 foram escolhidos por fazerem parte do padrão de configuração de painéis MLCC em algumas empresas europeias certificadas sob o EAD 130005-00-0304 (EAD, 2015). No Apêndice 5 estão ilustrados os painéis com as classes de resistência posicionadas em cada camada.

7.3 MONTAGEM E COLAGEM DOS PAINÉIS

Para a montagem de cada painel, as lamelas foram escolhidas aleatoriamente da respectiva classe de resistência delimitada no tratamento. Antes do processo de colagem e com no máximo 24 h antecedentes, as lamelas foram aplainadas para a uniformização da superfície e abertura das células da madeira. Adicionalmente, um jato de ar comprimido foi aplicado ao longo das lamelas para eliminar pequenas partículas que poderiam, porventura, obstruir as células. Esse processo melhora a ancoragem e aderência do adesivo à madeira.

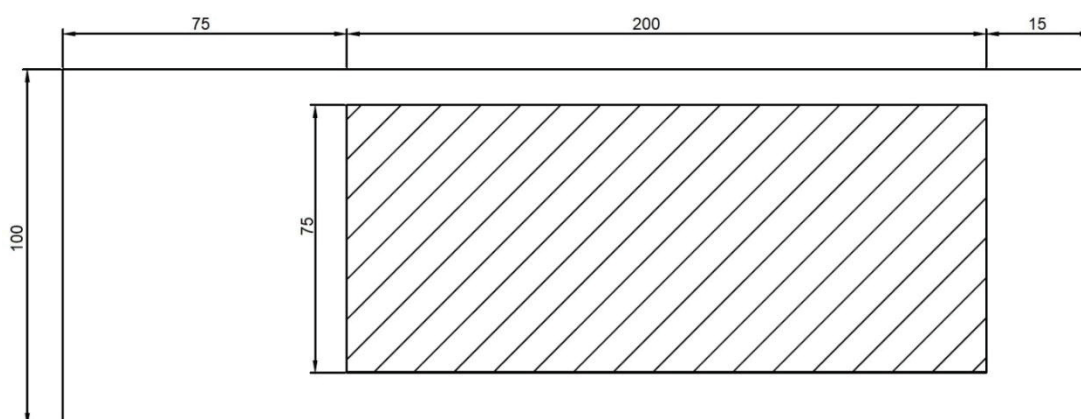
O adesivo estrutural utilizado foi o adesivo comercial PUR 501.0 da Kleiberit®, mono-componente a base de poliuretano. A gramatura aplicada de 200 g.m⁻² foi entre a faixa recomendada pelo fabricante. A pressão de colagem foi de aproximadamente 1,0 MPa. O tempo de prensagem ocorreu durante 24 h em uma prensa manual por motivos operacionais nesse estudo. Contudo, o tempo recomendado pelo fabricante é de em média quatro a seis horas, conforme a temperatura e umidade do ambiente. Após esse processo, os painéis foram acondicionados para término da cura por no mínimo 24 h.

7.4 ADEQUAÇÃO DOS PAINÉIS PARA TESTE

A dimensão dos painéis foi de 60 mm × 1000 mm × 2900 mm (espessura × largura × comprimento). Após a completa cura, eles foram esquadrejados nas quatro laterais para eliminar excesso de cola e os topos. Devido às grandes dimensões, os painéis foram cortados com o auxílio de uma serra circular.

Em seguida, o painel foi cortado com as dimensões de 750 mm × 2000 mm (largura e comprimento), para o ensaio não destrutivo à flexão do painel em tamanho estrutural. O restante do material foi utilizado para obtenção dos corpos de prova destinados aos ensaios destrutivos. A Figura 41 ilustra as dimensões e o local de corte para a obtenção do painel utilizado no ensaio não destrutivo.

Figura 41 - Área superficial do painel MLCC com destaque na área de corte do painel para ensaio não destrutivo.



Unidade de medida em mm.

Fonte: A autora (2023).

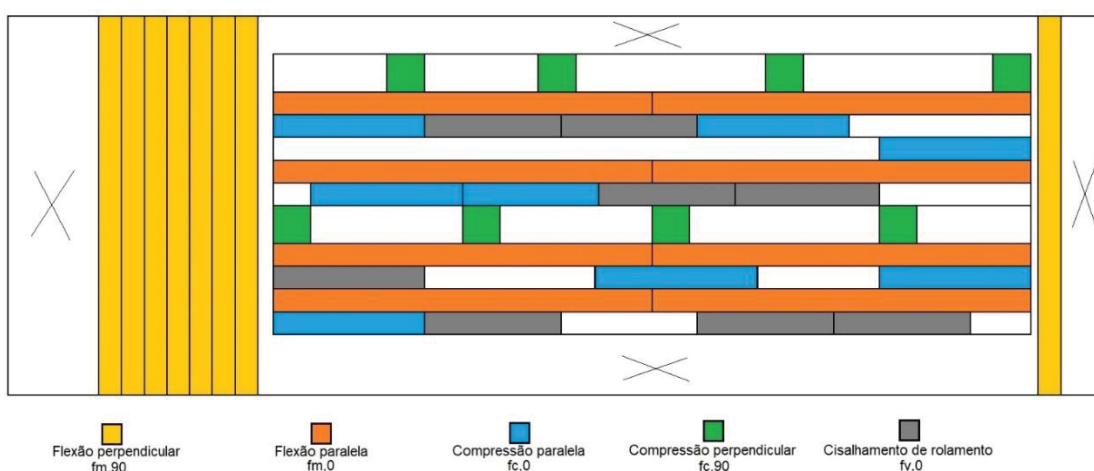
7.5 CORPOS DE PROVA PARA OS TESTES DE RESISTÊNCIA

Os painéis foram cortados em uma serra circular para obter os corpos de prova para os testes destrutivos. Os corpos de prova foram preparados para os testes de flexão paralela e perpendicular ao plano do painel e compressão paralela e perpendicular ao plano e cisalhamento de rolamento do painel. Parte

dos corpos de prova foi extraída do painel utilizado no teste não destrutivo à flexão e parte de áreas não ensaiadas.

Devido às ocorrências de sulcos durante a produção do painel, os corpos de prova foram cortados de partes onde a largura e profundidade do sulco eram menores que os valores recomendados pela norma EN 16351 (EN, 2015). Na Figura 42 está ilustrado um exemplo de corte aleatório para obtenção dos corpos de prova.

Figura 42 - Exemplo corte dos corpos de prova para determinar as propriedades do MLCC em relação à área total da superfície do painel. As áreas de exclusão estão marcadas com X.



Fonte: A autora (2023).

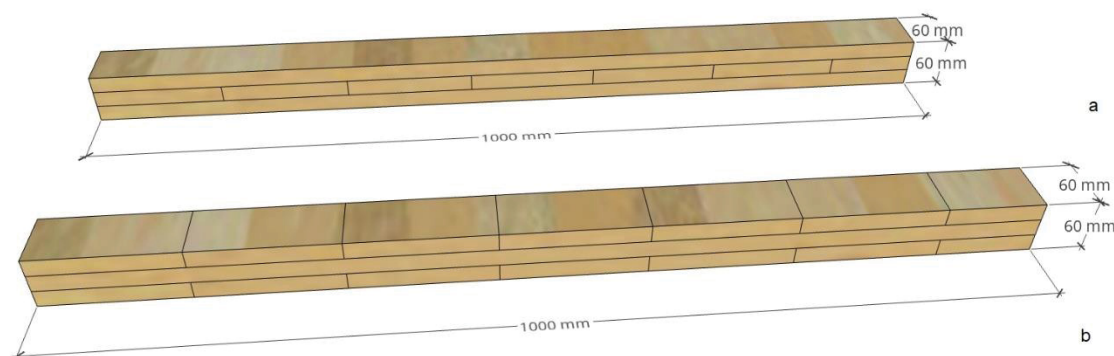
O número de corpos de prova seguiu as recomendações da EN 16351 (EN, 2015). Para painéis com largura superior a 800 mm, a norma indica o corte de 7 corpos de prova.

As dimensões dos corpos de prova seguiram as recomendações da norma EN 16351 (EN, 2015), que menciona a EN 408 (EN, 2012) como norma base para dimensionamento e execução dos testes destrutivos em corpos de prova.

A EN 408 preconiza que o comprimento do corpo de prova para o teste de flexão a quatro pontos, seja $18h \pm 3h$, sendo h a espessura. Os corpos de prova para a flexão perpendicular foram extraídos do painel antes do esquadrejamento. Assim, foi possível manter a relação de $15h$, totalizando um comprimento de 900 mm para o vão entre apoios. Para fins de padronização, o mesmo comprimento foi assumido para os corpos de prova de flexão paralelos

ao plano. Na Figura 43 estão ilustrados o aspecto final dos corpos de prova para o ensaio a flexão destrutiva.

Figura 43 – Ilustração de corpos de prova extraídos par o teste de flexão paralela (a) e perpendicular (b) ao plano de um painel MLCC.



Fonte: A autora (2023).

Os corpos de prova de compressão paralela seguiram as premissas da norma EN 408 (EN, 2012). A norma preconiza um comprimento de $6h$, considerando h para a menor dimensão da área transversal. Neste estudo, o lado limitante foi a própria espessura do painel (60 mm), portanto o comprimento dos corpos de prova foi de 360 mm.

Para a compressão perpendicular ao plano do painel, a norma EN 16351 aborda que corpos de prova devem ter a espessura total do painel. Como os corpos de prova não são normalizados para os painéis MLCC, as dimensões dos corpos de prova foram adaptadas com base no estudo de Brandner (2018). Assim, oito corpos de prova foram cortados com dimensões de 100 mm x 100 mm x 60 mm.

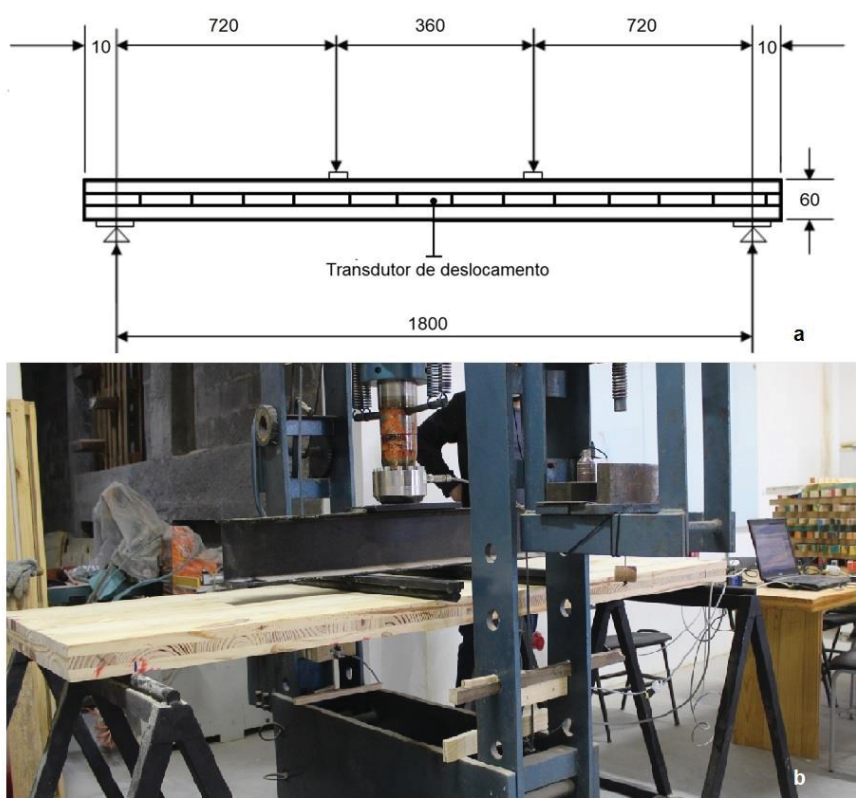
Para obtenção da resistência do cisalhamento de rolamento ($f_{v,0}$), a configuração de ensaio seguiu a metodologia de vários estudos como CAO *et al.* (2019), Hosseinzadeh, Mohebbi e Elyasi (2020), Li (2017) e Li, Dong e Lim (2019). Para assegurar que os corpos de prova rompessem por cisalhamento, o vão foi configurado em $6h$, sendo h a espessura do corpo de prova. Assim, as dimensões finais dos corpos de prova foram de 60 mm x 60 mm x 420 mm. Neste ensaio, os corpos de prova foram cortados longitudinalmente ao painel, totalizando sete corpos de prova extraídos por painel, conforme a indicação normativa para painéis com 800 mm de largura ou superior.

7.6 TESTE NÃO DESTRUTIVO DOS PAINÉIS

Para cada tratamento foram ensaiados 3 painéis. A norma para ensaios à flexão a quatro pontos, em MLCC, EN 16351 (EN, 2015), aponta que painéis com lamelas cuja razão entre a largura e a espessura igual maior a quatro ($b/h \geq 4$), normalmente falham na flexão, portanto, podem ser testados com a configuração de carregamento descrita na EN 408 (EN, 2012).

Os painéis foram testados à flexão a quatro pontos, dois pontos de suporte e dois pontos de carregamento. O deslocamento do painel foi medido em cada lado do painel com o auxílio de dois transdutores indutivos (WA[®] 50 mm) e a força aplicada foi medida com uma célula de carga (U10M[®] 125 kN). Ambos os equipamentos foram acoplados a um sistema de aquisição de (Quantum-X[®]) e um software (Catman Easy[®]) da empresa HBM[®]. Na Figura 44 estão ilustradas as configurações de teste para o ensaio não destrutivo à flexão a quatro pontos para painéis MLCC.

Figura 44 - Configurações para o ensaio não destrutivo à flexão de um painel MLCC para um vão de 1800 mm.



Fonte: A autora (2023).

Conforme a premissa da norma EN 408, o carregamento aplicado foi constante e a taxa de carregamento não foi maior que 0,003h mm.s⁻¹. Para os painéis deste estudo (60 mm de espessura), esse deslocamento foi de 10,8 mm.min⁻¹. O carregamento aplicado não excedeu 40% da capacidade total. Resultados obtidos de ensaios preliminares com painéis de *Pinus taeda* foram utilizados para determinar o máximo valor de carregamento.

O painel foi ensaiado duas vezes. Primeiro, com uma das camadas externas na zona de maior solicitação de esforço, em seguida, o painel foi rotacionado, de modo que a outra camada externa estivesse na zona de maior solicitação de esforço. O MOE do painel foi calculado pela média dos deslocamentos nos dois ensaios. O módulo de elasticidade do painel foi calculado pela Equação 21.

$$MOE = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{d_{40} - d_{10}}{f_{40} - f_{10}} - \frac{6a}{5Gb} \right)} \quad \text{Equação 21.}$$

Em que:

MOE é o módulo de elasticidade em MPa;

a é a distância entre o suporte e o ponto de aplicação do carregamento (mm);

l é a distância entre os pontos de aplicação do carregamento (mm);

b é a largura do corpo de prova (mm);

h é a espessura do corpo de prova (mm);

d_{40} é o deslocamento correspondente a um carregamento de 40% do carregamento total (N);

d_{10} é o deslocamento correspondente a um carregamento de 10% do carregamento total (N);

f_{40} é o carregamento a 40% do carregamento total (N);

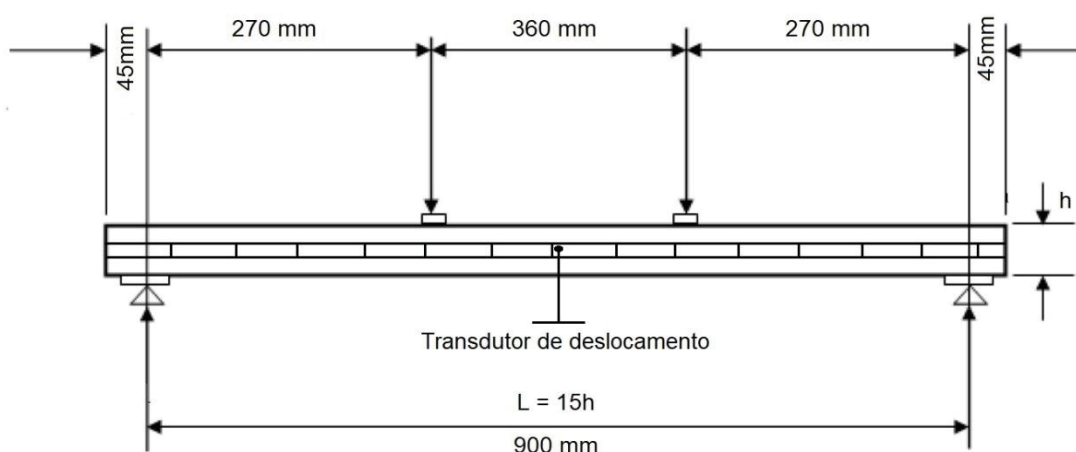
f_{10} é o carregamento a 10% do carregamento total (N);

G é o módulo de cisalhamento e assume valor infinito (MPa).

7.7 CONFIGURAÇÕES PARA OS TESTES DESTRUTIVOS

Para a avaliação da resistência à flexão do painel utilizaram-se corpos de prova descrito na seção 6.5. A configuração do ensaio seguiu as premissas da EN 408 (EN, 2012) e o teste foi executado à quatro pontos em uma máquina de ensaio universal EMIC (DL 300 kN). O vão entre apoios foi de 900 mm e a distância de aplicação da carga entre apoios foi de 360 mm. Os corpos de prova foram colocados sob apoios simples. Na Figura 45, estão ilustradas as distâncias entre apoios e pontos de carregamento para os corpos de prova com espessura (h) de 60 mm com vão foi de 900 mm.

Figura 45 - Configuração de ensaio a flexão estática para corpos de prova extraídos de painéis MLCC com vão de 900 mm.



Fonte: A autora (2023).

A norma define que o carregamento deve ser configurado a fim de que a ruptura do corpo de prova ocorra entre o tempo de ensaio de 180 a 420 s (3 a 7 min), com tempo ideal de 300 s. Para tal, cinco corpos de prova foram escolhidos aleatória e previamente ensaiados. Com posse desses resultados, o carregamento foi executado a uma velocidade de $3,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Imediatamente após o término do teste destrutivo à flexão, o teor de umidade foi medido nos corpos de prova. As agulhas foram inseridas o mais próximo possível dos locais das rupturas. Para a medição utilizou-se um higrômetro de agulhas da marca Digisystem, modelo DL 2000.

O módulo de elasticidade (MOE) e a resistência à ruptura (MOR) foram determinados pelas equações 21 e 22.

$$MOR = \frac{3Fa}{bh^2} \quad \text{Equação 22.}$$

Em que:

MOR é a resistência à flexão em MPa;

a é a distância entre o suporte e o ponto de aplicação do carregamento;

b é a largura do corpo de prova;

h é a espessura do corpo de prova;

Para o ensaio de compressão paralela ao eixo do painel, os corpos de prova foram cortados nos topos, de modo que estivessem planos e paralelos mutualmente e perpendiculares ao eixo do corpo de prova, conforme preconizado pela norma. A velocidade de ensaio foi a uma taxa de força constante de $17.000 \text{ N.min}^{-1}$, de modo que a ruptura ocorra dentro de 180 a 420s (3 a 7 min).

A resistência e a rigidez a compressão paralela ao plano do painel foram calculadas pela equação 23 e 24.

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{bh} \quad \text{Equação 23.}$$

$$E_{c,0} = \frac{l(F_{40} - F_{10})}{bh(d_{40} - d_{10})} \quad \text{Equação 24.}$$

Em que:

$f_{c,0}$ é a resistência a compressão paralela ao plano do painel (MPa);

F_{max} é o carregamento máximo aplicado nos corpos de prova (N);

b é a largura do corpo de prova (mm);

h é a espessura do corpo de prova (mm);

$E_{c,0}$ é a rigidez a compressão paralela ao plano do painel (MPa);

l é o comprimento entre os apoios (mm);

$F_{40} - F_{10}$ é o incremento da força de carregamento na porção reta da curva de deformação (N);

$d_{40} - d_{10}$ é o incremento da deformação correspondente a $F_{40} - F_{10}$ (mm).

O ensaio de compressão perpendicular ao plano do painel foi conduzido com base na norma europeia EN 408 (EN, 2012), com exceção da geometria. Os corpos de prova tiveram as extremidades preparadas, de modo a garantir que estivessem planos um em relação ao outro e perpendiculares ao eixo. A velocidade de ensaio foi a uma taxa de força constante de $12.000 \text{ N.min}^{-1}$, para que a ruptura ocorra dentro de 180 a 420s (3 a 7 min). A resistência a compressão perpendicular foi calculada com a Equação 25.

$$f_{c,90} = \frac{F_{max}}{bh} \quad \text{Equação 25.}$$

$f_{c,0}$ é a resistência a compressão paralela ao plano do painel (MPa);

F_{max} é o carregamento máximo aplicado nos corpos de prova (N);

b é a largura do corpo de prova (mm);

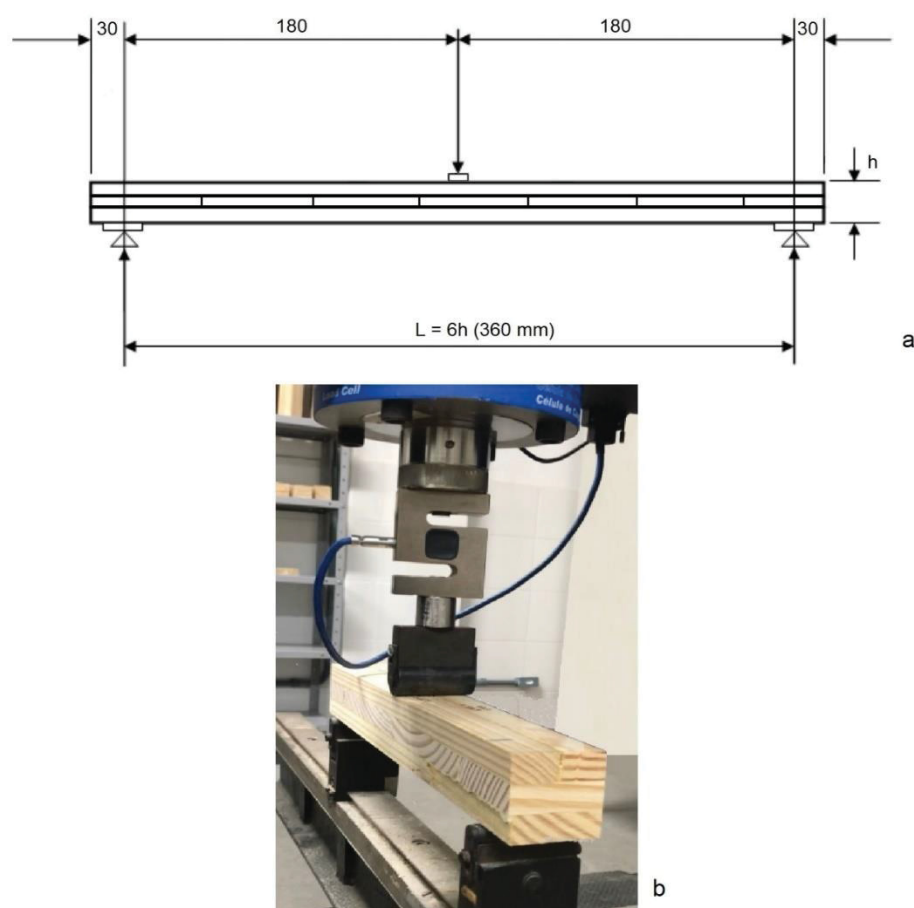
h é a espessura do corpo de prova (mm);

O ensaio de cisalhamento do painel foi baseado no ensaio de flexão da norma europeia EN 16351 (2015). Contudo, o vão do ensaio foi de 6h, baseado em estudos de Cao *et al.* (2019), Hosseinzadeh, Mohebbi e Elyasi (2020), Li (2017) e Li, Dong e Lim (2019). O menor vão assegura que ocorra a ruptura da viga por cisalhamento.

O número de corpos de prova foi determinado pela EN 16351 (EN, 2015), que solicita 7 corpos de prova para painéis com larguras iguais ou superiores a 800 mm. Como a velocidade de ensaio não é descrita na norma, utilizou-se o tempo entre 180 e 420 s (3 a 7 min) para a calibração da velocidade. Assim, a velocidade neste teste foi de 3 mm.min^{-1} . Na Figura 46, estão ilustradas as distâncias entre apoios e pontos de carregamento para os corpos de prova e um corpo de prova durante o ensaio. As distâncias entre apoios de aplicação do carregamento são definidas em função da espessura

dos corpos de prova. Como apenas a resistência foi estudada, transdutores de deslocamento não foram necessários. A resistência ao cisalhamento foi determinada pela equação 26.

Figura 46 - Configuração de ensaio de resistência ao cisalhamento transversal do painel.



Configuração de ensaio com as distâncias (mm) entre pontos de apoio e aplicação da força (a) e exemplo de um corpo de prova com vão de 360 mm durante o ensaio (b).

Fonte: A autora (2023).

$$f_v = 1,5 \frac{f_{max}}{2bh} \quad \text{Equação 26.}$$

Em que:

f_v resistência ao cisalhamento de rolamento (MPa);

f_{max} carregamento máximo aplicado nos corpos de prova (N);

b largura do corpo de prova (mm);

h espessura do corpo de prova (mm).

7.8 ESTATÍSTICA

Inicialmente os dados médios dos tratamentos foram apresentados com base nas lamelas utilizadas em cada painel. Esse passo foi executado para fins de comparação com os Documentos de Aprovação Técnica Europeia (ETAs), visto que muitos produtores apenas declaram as especificações das lamelas utilizadas na produção. Portanto, os dados dos tratamentos foram comparados qualitativamente com os dados declarados pelos produtores de painéis de diferentes locais da Europa.

Em seguida, os resultados médios relativos a cada tratamento foram apresentados com base nos ensaios laboratoriais. A média do MOE do painel foi obtida por meio do ensaio não destrutivo do painel. Esse valor foi comparado com: (i) os valores declarados em função da classificação do MOE das lamelas utilizadas na composição dos painéis, e (ii) pelos valores médios declarados nas ETAs por diferentes produtores europeus. Na comparação (i) utilizou-se o teste t (Student) com α de 0,05.

Pelos ensaios destrutivos resultaram as resistências à flexão média e característica, módulo de elasticidade à flexão, resistência à compressão paralela e perpendicular ao plano e resistência ao cisalhamento de rolamento do painel. Os dados foram corrigidos para o teor de umidade a 12%.

Os dados foram testados pela normalidade de Kolmogorov-Smirnov com α 0,05. Eles foram normais para a rigidez a flexão paralela, resistência à flexão perpendicular, compressão paralela e cisalhamento de rolamento. Nos dados para as propriedades de rigidez à flexão perpendicular, rigidez à compressão paralela e a resistência à compressão perpendicular ao plano do painel, os dados não eram normais pelo teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (α 0,05) e passaram pela transformação de Johnson. Quando o p-valor da transformação foi maior que 0,05, seguiu-se com o teste de médias Tukey. Para a flexão paralela os dados resultaram em não-normais e, quando o p-valor das transformações foram menores que 0,05, seguiu-se para a comparação das médias pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (α 0,05).

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS PAINÉIS MLCC

8.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS PAINÉIS

Uma das formas de declarar os valores de referência do painel MLCC para obtenção da ETA, é pelas propriedades das lamelas utilizadas na sua fabricação. As camadas externas e internas dos painéis nos tratamentos foram compostas com base no MOE obtido no ensaio de flexão não destrutivo das lamelas na Parte 1. O MOE médio nos tratamentos em função das lamelas nas camadas externas e internas são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Valores do módulo de elasticidade médio das camadas externa (CEx) e interna (CI) dos painéis em quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4), determinados pelos ensaios não destrutivos nas tábuas.

Tratamento		MOE por camada (MPa)			MOE (Classe Estrutural)	
		Ext. ₁	Int.	Ext. ₂	Painel	Tratamento
T1 (CEx: NS1 / CI: NS1)	P1	4.966	4.983	4.731	4.893	5.062 (NS)
	P2	4.892	4.593	5.442	4.976	
	P3	5.190	5.226	5.541	5.319	
T2 (≥C24 / C16 a C22)	P1	14.574	9.974	14.498	13.015	12.937 (C30)
	P2	15.940	9.511	14.484	13.311	
	P3	14.886	10.235	12.338	12.486	
T3 (C16 a C22 / C14 e C16)	P1	9.131	7.500	9.393	8.675	8.877 (C16)
	P2	9.438	7.662	9.666	8.922	
	P3	9.368	7.910	9.820	9.033	
T4 (C14 e C16 / NS2)	P1	7.706	6.586	7.441	7.244	7.318 (C14)
	P2	8.364	6.565	8.158	7.696	
	P3	7.420	6.237	7.383	7.014	

Classes de qualidade baseadas na norma europeia EN 338 (2016) para a propriedade do módulo de elasticidade. Valores médios para o tratamento em negrito. Ext. – camada externa; Int. – camada interna.

Fonte: A autora (2023).

Nota-se que o MOE, apresentou pouca variação entre os painéis nos tratamentos. Os tratamentos tiveram baixos coeficientes de variação, sendo o T1 com 4,5%, T2 de 3,2%, T3 de 2,1% e T4 de 4,7%. Isso ocorreu devido à

configuração do painel, que priorizou camadas com um pequeno intervalo de valores do MOE. Adicionalmente, houve pouca diferença da propriedade entre as lamelas das camadas externas e as lamelas das camadas internas. Os baixos coeficientes de variação para os tratamentos são reflexos dessa distribuição.

No T2, o MOE resultante permitiu que os painéis sejam enquadrados em classes de resistência C30. Como a configuração desse painel foi inicialmente concebida para alocar lamelas com MOE igual ou superior à classe C24 nas camadas externas, algumas lamelas utilizadas tinham altos MOE (e.g., classes C40 e C45), consequentemente, isso elevou o MOE do painel.

Já nos T3 e T4, as lamelas externas acabaram compensando o menor MOE das lamelas da camada interna. Em decorrência disso, o MOE dos painéis ficou próximo ao valor declarado inicialmente para as camadas externas.

Fink (2018) estudou painéis de cinco produtores de MLCC que usavam lamelas C24 ou superior na fabricação dos painéis, configuração similar ao deste estudo. O autor afirmou que a rigidez dos painéis foi maior que a média declarada com base das tábuas. Essa tendência foi similar ao T2, e pode ser devido à seleção das lamelas para a confecção dos painéis, pois quando uma ou mais lamelas apresentam classes estruturais mais altas (>C24), consequentemente há um aumento da propriedade média declarada.

A segunda maneira de declarar os valores de referência do painel MLCC para obtenção do certificado ETA é pelo ensaio dos painéis em tamanho estrutural para obtenção do MOE. O MOE médio dos painéis foi obtido em testes de flexão não destrutivo a quatro pontos. Os resultados médios dos tratamentos podem ser observados na Tabela 41.

Para o MOE obtido nos testes não destrutivos, o resultado do teste de médias Tukey (α 0,05) indicaram diferenças estatísticas entre os tratamentos. O tratamento T1 derivou as menores médias, sendo todas menores que os valores determinados pelas normativas NBR 7190 – 2 e EN 338 para o uso da madeira em produto estrutural (ABNT, 2022b; EN, 2016).

Os tratamentos T3 e T4 igualaram-se entre si (p-valor 0,2648), porém, se diferenciaram estatisticamente dos demais. Ao comparar os valores médios com os tabelados pela EN 338 (EN, 2016), nota-se que pelo MOE o T3 pode ser considerado classe C20 e o T4 C16.

Tabela 41 - Valores do MOE nos painéis formados por três camadas com a madeira de *Pinus taeda* e valor médio do MOE nos tratamentos.

Tratamento	Painel	MOE (MPa)	MOE médio (MPa)
T1	P1	4.308	4.427 c (NS)
	P2	4.806	
	P3	4.168	
T2	P1	12.906	12.953 a (C30)
	P2	13.684	
	P3	12.269	
T3	P1	9.862	9.949 b (C20)
	P2	10.280	
	P3	9.704	
T4	P1	7.595	8.810 b (C16)
	P2	9.790	
	P3	9.045	

MOE – módulo de elasticidade à flexão.

Fonte: A autora (2023).

Já o tratamento T2, se diferenciou estatisticamente dos demais e teve as maiores médias. Esse resultado enquadra o T2 como C30 pela norma europeia EN 338 (EN, 2016).

Os valores deste estudo foram equiparados com os resultados de Pereira e Calil Junior (2019). Os autores estudaram painéis MLCC de cinco camadas, com 80 mm de espessura, fabricados em laboratório com *Pinus taeda*. O MOE obtido pelos autores foi de 5.461 MPa, portanto, com exceção do T1, os demais tratamentos apresentaram médias superiores. No entanto, como os autores não especificaram possíveis classificações das tábuas, não foi possível comparar a qualidade do painel utilizado no estudo.

Vilela e Mascia (2021) avaliaram as propriedades de amostras extraídas de painéis industriais de MLCC de *Pinus taeda* proveniente do Brasil. A espessura total do painel era de 160 mm com cinco camadas. Os valores médios do MOE de 14.029 MPa. Embora superiores a este estudo, ressalta-se que os autores não especificaram a qualidade das lamelas usadas para a

fabricação dos painéis. Além disso, as cinco camadas do painel e a elevada espessura, podem ter contribuído para a elevada rigidez.

Para comparar os valores médios dos tratamentos com os valores declarados para o certificado ETA de diferentes produtores europeus, utilizou-se o T2 e o T3. Esses tratamentos foram usados na comparação por apresentarem configurações similares aos utilizados por empresas europeias. Desse modo, o T2 apresentou valores similares aos praticados pelas empresas, sendo que o valor declarado é de 12.000 MPa para painéis com constituição de lamelas C24 e C30 (ETA 06/0138, 2017; ETA 08/0238, 2018; ETA 14/0349, 2019; ETA 11/0189, 2019). O T3 apresentou resultados superiores aos declarados na ETA 14/0349 (2019), que declararam o MOE de 8.000 MPa para um produto fabricado com lamelas de classe C16. Como o T3 deste estudo é formado pela mistura de lamelas C16 e C14, observa-se que neste caso, o uso de lamelas com menor classificação na camada interna não afetou a rigidez total do painel, podendo indicar uma possibilidade de maior aproveitamento da matéria-prima.

Os resultados das rigidezes ainda sugerem uma similaridade entre os painéis de *Pinus taeda* de alto crescimento e os painéis com diferentes coníferas europeias, ambos produzidos com as camadas ordenadas por classes de resistência. Esse pode ser um indicativo do potencial da espécie de rápido crescimento para o uso em painéis MLCC, visando o comércio nacional e o internacional.

Outro resultado obtido foi com a comparação das duas formas de declaração do MOE nos painéis, ou seja, pelas classes de resistência das lamelas e pelo ensaio não destrutivo do painel. Para confrontar as duas formas de avaliação da propriedade, um teste entre amostras independentes (t de Student) com α de 0,05 foi executado entre o MOE obtido pelas lamelas (Tabela 40) e o MOE do painel determinado com base no ensaio de flexão não destrutivo (Tabela 41) em cada tratamento. Os resultados indicaram que em todos os casos, os valores de MOE declarados pelas lamelas foi estatisticamente similar aos valores obtidos em função do ensaio de flexão não destrutivo. Os p-valores foram de 0,2614, 0,9805, 0,1314 e 0,1766 para o T1, T2, T3, e T4, respectivamente. Embora a amostragem de painéis tenha sido pequena neste estudo, esse resultado pode ser um indicativo da eficiência da

classificação mecânica das lamelas e da distribuição por camadas na montagem dos painéis.

8.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ENSAIOS DESTRUTIVOS

As propriedades mecânicas avaliadas por ensaios destrutivos foram a resistência e rigidez à flexão paralela e perpendicular ao plano do painel, a resistência e rigidez à compressão paralela ao plano, a resistência à compressão perpendicular ao plano e o cisalhamento de rolamento paralelo ao plano do painel.

Ressalta-se que com exceção dos corpos de prova de flexão perpendicular ao plano do painel, os demais provieram dos painéis ensaiados para obtenção do MOE não destrutivo. Como neste ensaio se priorizou um deslocamento e força na zona elástica, não se constatou nenhuma ruptura ou descolamento da linha de cola que pudesse interferir na extração dos corpos de prova para os ensaios destrutivos.

Durante os ensaios, alguns corpos de prova foram descartados devido ao tempo de teste não estar conforme o recomendado pelas normativas. No entanto, embora com a exclusão desses corpos de prova, o tempo de ensaio médio para as propriedades foi de cerca de 5 minutos (300 s). No T1, dos 24 corpos de prova ensaiados no teste de flexão, cinco foram excluídos das análises devido à ruptura em menos de 120 s de teste. Nesses casos, como as forças máximas foram muito pequenas, as resistências e rigidezes calculadas foram baixas e consideradas discrepantes. Nos T3 e T4, alguns corpos de prova foram excluídos da análise devido à ruptura em tempo menor (120 s) que o estipulado pela norma.

Como os corpos de prova de flexão perpendicular dependeram do comprimento total do painel antes do esquadrejamento, a quantidade de amostragem foi menor. Isso ocorreu pela insuficiência de largura de alguns painéis para a retirada de corpos de prova, e/ou devido a falhas de colagem nas bordas. Nesses casos, os corpos de prova não apresentavam o comprimento necessário, portanto, não foram confeccionados.

Para o teste de cisalhamento de rolamento, no T1 alguns corpos de prova apresentaram falhas da linha de cola, e foram excluídos da análise.

Na Tabela 42 estão apresentados os valores médios, característicos e os coeficientes de variação para as propriedades de resistência e rigidez à flexão, compressão e cisalhamento de rolamento para os tratamentos deste estudo. Os dados foram corrigidos pelo teor de umidade conforme a norma brasileira NBR 7190 – 1 (ABNT, 2022a).

Tabela 42 - Valores médios e característicos para diferentes propriedades mecânicas obtidas por ensaios destrutivos.

Tratamento		Propriedade (MPa)							
		MOR	MOE	f _{m,90}	E ₉₀	f _{c,0}	E _{c,0}	f _{c,90}	f _{v,0}
T1	Média	18,0	4.231	5,9	587,2	25,5	3.393	4,3	2,5
	c.v. (%)	16,6	14,3	19,1	18,5	12,1	15,2	14,6	17,3
	k	14,1	-	4,5	-	23,2	-	3,4	1,7
	n	19	19	11	11	24	24	21	19
T2	Média	48,2	12.912	8,7	673,3	32,0	4.291	4,8	3,1
	c.v. (%)	10,8	9,6	20,2	15,7	6,5	9,5	4,5	16,6
	k	43,2	-	6,6	-	31,4	-	4,9	2,5
	n	24	24	22	22	23	23	21	21
T3	Média	40,9	8.809	6,9	674,2	28,8	4.147	4,6	2,6
	c.v. (%)	15,6	15,5	20,5	23,9	12,6	12,4	3,9	20,4
	k	33,1	-	5,7	-	24,1	-	4,8	1,9
	n	23	23	16	16	25	25	21	21
T4	Média	38,4	8.192	8,1	763,0	27,1	3.725	4,3	2,3
	c.v. (%)	20,4	24,7	29,2	30,4	16,7	19,2	9,3	22,3
	k	29,5	-	4,7	-	22,9	-	3,9	1,4
	n	22	22	10	10	25	25	21	21

MOR – resistência à flexão paralela ao plano do painel; MOE – Módulo de elasticidade à flexão paralela ao plano do painel; $F_{m,90}$ – resistência à flexão perpendicular ao plano do painel; E_{90} – Módulo de elasticidade perpendicular ao plano do painel; $F_{c,0}$ – resistência a compressão paralela ao plano do painel; $E_{c,0}$ – Módulo de elasticidade à compressão paralela ao plano do painel; $F_{c,90}$ – resistência a compressão perpendicular ao plano do painel; $F_{v,0}$ – resistência ao cisalhamento; c.v. – coeficiente de variação em porcentagem; k – valor característico.

Fonte: A autora (2023).

Os coeficientes de variação indicaram maior dispersão dos dados para o T4 na propriedade de resistência e rigidez à flexão paralela ao plano do painel, nos demais tratamentos os c.v. podem ser considerados bons (ISO 3129, 2019; FLP, 2010).

Os c.v. nas propriedades de resistência e rigidez à flexão perpendicular ao plano podem ser considerados um pouco altos, em particular no T4. No entanto, isso pode ser devido a maior probabilidade da presença de nós na camada interna, por serem lamelas de menor módulo de elasticidade. Assim, um corpo de prova que porventura apresente um nó, poderá ter diferente deslocamento e resistência, resultando em uma maior dispersão dos dados.

Comparando com os coeficientes de Vilela e Mascia (2021) no teste de flexão estática, observa-se que para o MOR e MOE os c.v. foram de 16,39% e 18,38% respectivamente. Para a resistência, observa-se uma homogeneidade na variação entre os estudos. Para a rigidez os coeficientes foram um pouco menores aos apresentados pelos autores, a exceção foi no T4 que teve maiores c.v.

Embora, o tratamento T1 tenha lamelas com menor MOE, consequentemente haja uma maior probabilidade de defeitos, nesse tratamento ambas as camadas interna e externa possuem similar qualidade da madeira. Isso pode ter diminuído a maior variação e consequentemente resultou em um menor c.v.

Nos testes de compressão paralela e perpendicular, os c.v, apresentaram baixos valores. Para a compressão paralela isso pode significar uma boa homogeneidade da propriedade. Para a compressão perpendicular cujos corpos de prova não possui a geometria estipulada por normativas, além da homogeneidade da propriedade, pode indicar uma boa eficiência dos corpos de prova para painéis com três camadas.

Para o cisalhamento de rolamento, embora com resultados de c.v. um pouco superiores a 18%, pode-se considerar que os corpos de prova com vão de 6.h, foram suficientes para amostrar e caracterizar a propriedade para painéis de três camadas.

Com os valores médios e característicos nas diferentes propriedades pode-se comparar as classes de resistência dos tratamentos com as classes estabelecidas pela norma europeia EN 338 (EN, 2016) para a madeira estrutural, bem como, com as classes designadas na norma brasileira NBR 7190 – 2 (ABNT, 2022b) para a madeira estrutural de *Pinus*.

Dessa forma, pela EN nota-se que na $f_{m,0,k}$ o T1 se enquadrou como C14, o T2 como C40, o T3 como C30 e o T4 como C27. Ao utilizar a $f_{c,0,k}$ o T1

foi enquadrado como C27, o T2 como C50, o T3 como C30 e o T4 como C27. Na compressão perpendicular $f_{c,90,k}$ todos os tratamentos apresentaram a maior classe de resistência (C50). Já ao comparar os valores médios do MOE, observa-se que no T1 os painéis não foram considerados estruturais, pois apresentam MOE menor que 7.000 MPa. O T2 é classificado como C30, e os tratamentos T3 e T4 como C16. Pelo E_{90} todos os tratamentos são enquadrados na maior classe estrutural C50.

Em suma, ao considerar a menor classificação obtida pelo tratamento, tem-se que o T1 não é considerado estrutural devido aos baixos valores de MOE. O T2 é classificado como C30, o T3 e T4 como C16 e em todos os tratamentos a propriedade limitante foi o MOE.

Pela NBR observa-se que pelo MOE obtido à flexão paralela ao plano do painel, o T1 não apresenta valores mínimos para ser estrutural. O T2 é classificado como Classe 1, e o T3 e T4 como Classe 2. Pela resistência característica à flexão, o T1 enquadra-se na Classe 3, e os demais como Classe 1. Pela resistência característica a compressão todos os tratamentos são enquadrados como Classe 1.

Na norma brasileira a propriedade limitante para enquadramento nas classes de resistência também foi o MOE. Assim, o T1 foi classificado como não estrutural, o T2 pode ser considerado Classe 1 e os T3 e T4 como Classe 2.

Para comparação dos tratamentos entre as propriedades, os dados foram submetidos a um teste de normalidade e um teste de médias, ambos com um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

Os dados foram considerados normais para as propriedades de resistência à flexão perpendicular ao plano (p-valor 0,9519), resistência à compressão paralela (p-valor 0,1196), e resistência ao cisalhamento de rolamento (p-valor 0,5963). Nesses casos, seguiu-se com o teste de médias Tukey.

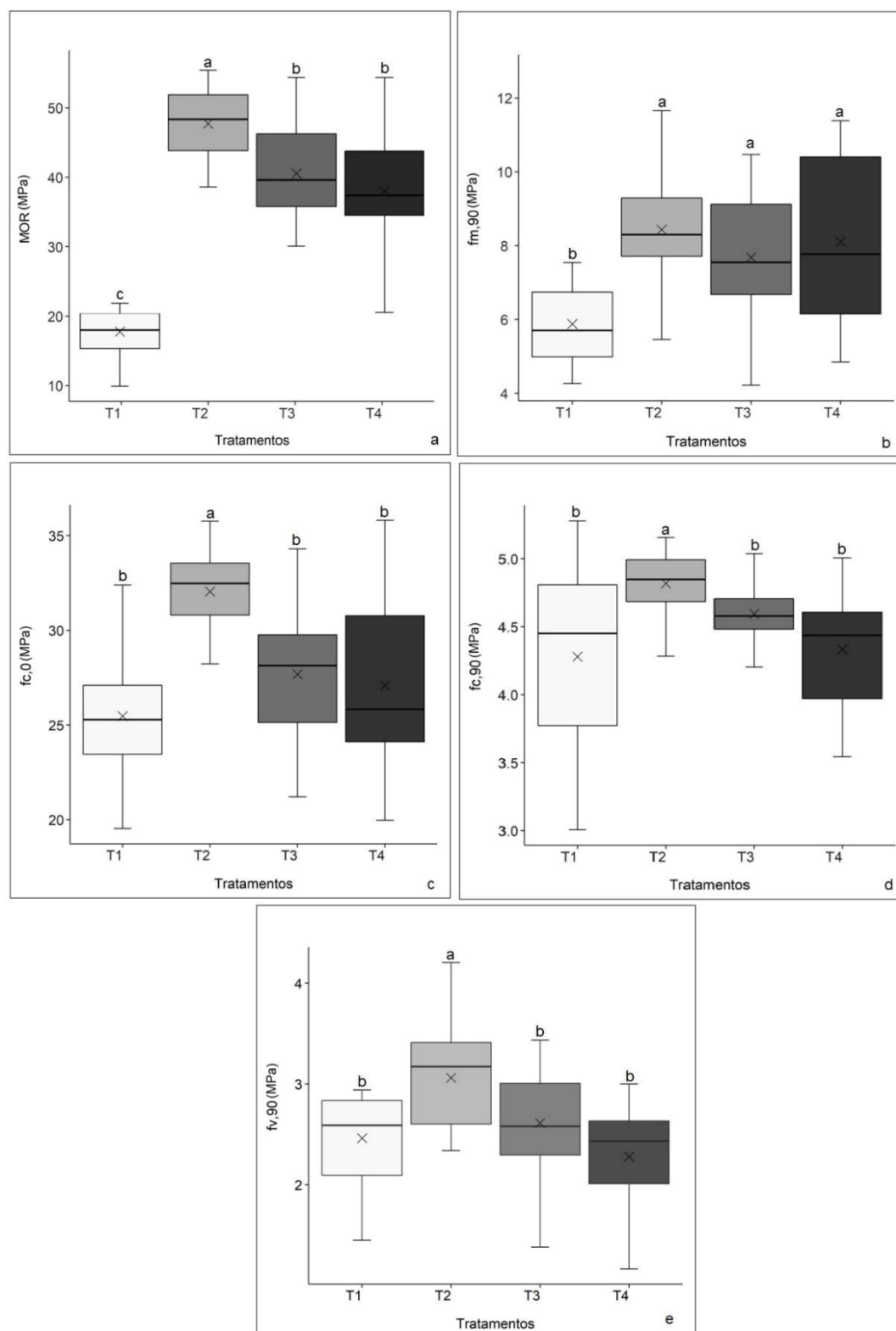
Para a propriedade de resistência à compressão perpendicular os dados não tiveram significância estatística para serem considerados normais, ou seja, o p-valor foi menor que 0,05. Então, seguiu-se com a transformação dos dados, sendo que a transformação de Johnson (p-valor 0,4639) foi suficiente para normalização. Em seguida, foi executado o teste de médias Tukey.

Para a resistência à flexão paralela ao plano não foi possível a transformação dos dados para normalização. Portanto, executou-se a comparação de médias pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com $\alpha = 0,05$.

Na Figura 47 estão ilustrados os gráficos BoxPlot com as médias e dispersões entre os tratamentos e as comparações de médias para as diferentes propriedades. O T1 apresentou as menores médias e foi significativamente diferente de T2 em todas as propriedades, e diferiu de T3 e T4 para as propriedades de resistência à flexão paralela e perpendicular. Na compressão paralela e perpendicular, embora com grande dispersão dos dados, ele foi similar com os tratamentos T3 e T4. O tratamento T2 teve as maiores médias em todas as propriedades avaliadas e para a resistência à flexão perpendicular foi estatisticamente similar aos T3 e T4. Os tratamentos T3 e T4 tiveram resultados intermediários em todas as propriedades avaliadas.

Ao analisar as ETAs de produtores de painéis MLCC feitos com lamelas de classe C24, Fink *et al.* (2018) observou que as propriedades de resistência característica à flexão são na faixa de 24 a 28,8 MPa (a maioria dos produtores com 26,4 MPa) e módulo de elasticidade entre 11.000 e 12.500 MPa. A resistência ao cisalhamento de rolagem característico ocorre na faixa de 0,8 a 1,25 MPa. Os autores comentaram que a grande variedade dos painéis produzidos por produtores europeus é devido à variabilidade entre os produtores, entre os lotes de madeira de cada produtor e a variabilidade nos lotes inerentes à madeira. Assim, os autores afirmaram que enquanto a produção de MLCC for regulamentada apenas por ETAs, as propriedades de resistência no nível característico têm de ser consideradas apropriadas, pelo menos, até que haja calibração do cálculo de desempenho para os valores característicos.

Figura 47 - Valores e comparações entre as médias de quatro diferentes tratamentos de painéis MLCC de *Pinus taeda*.



MOR – Resistência à flexão ao plano do painel; $f_{m,90}$ – resistência à flexão perpendicular ao plano do painel; $f_{c,0}$ – resistência à compressão paralela ao plano do painel; $f_{c,90}$ – resistência à compressão perpendicular ao plano do painel; $f_{v,90}$ – resistência ao cisalhamento de rolamento.

Fonte: A autora (2023).

Após a comparação das propriedades de resistência se seguiu para as propriedades de rigidez. Para a propriedade de rigidez à flexão paralela ao plano os dados foram considerados normais (p-valor de 0,0581). Para a rigidez à flexão perpendicular ao plano e para a compressão paralela, os dados não foram normais, com p-valores de 0,007 e 0,0426, respectivamente. Assim, os dados foram transformados pela Transformação de Johnson (p-valores de 0,6737 e 0,4306), e em seguida seguiu-se para o teste de médias Tukey.

Na Figura 48, estão ilustrados os gráficos BoxPlot com as diferentes médias e dispersões entre os tratamentos e com as respectivas comparações de médias para as propriedades de rigidez.

Como nas propriedades de resistência, o T1 apresentou os menores valores. Contudo, ele foi estatisticamente significativo e igualou-se aos demais tratamentos na rigidez à flexão perpendicular ao plano. Na rigidez à compressão, ele igualou-se ao tratamento T4. Nesses casos, se observa que a variabilidade dos dados pode ter influenciado para a igualdade estatística. O T2 apresentou as maiores médias e foi estatisticamente diferente em quase todas as propriedades. Os T3 e T4 tiveram médias intermediárias. No entanto, o T3 foi estatisticamente maior que o tratamento T4 e igualou-se ao T2 na rigidez à compressão.

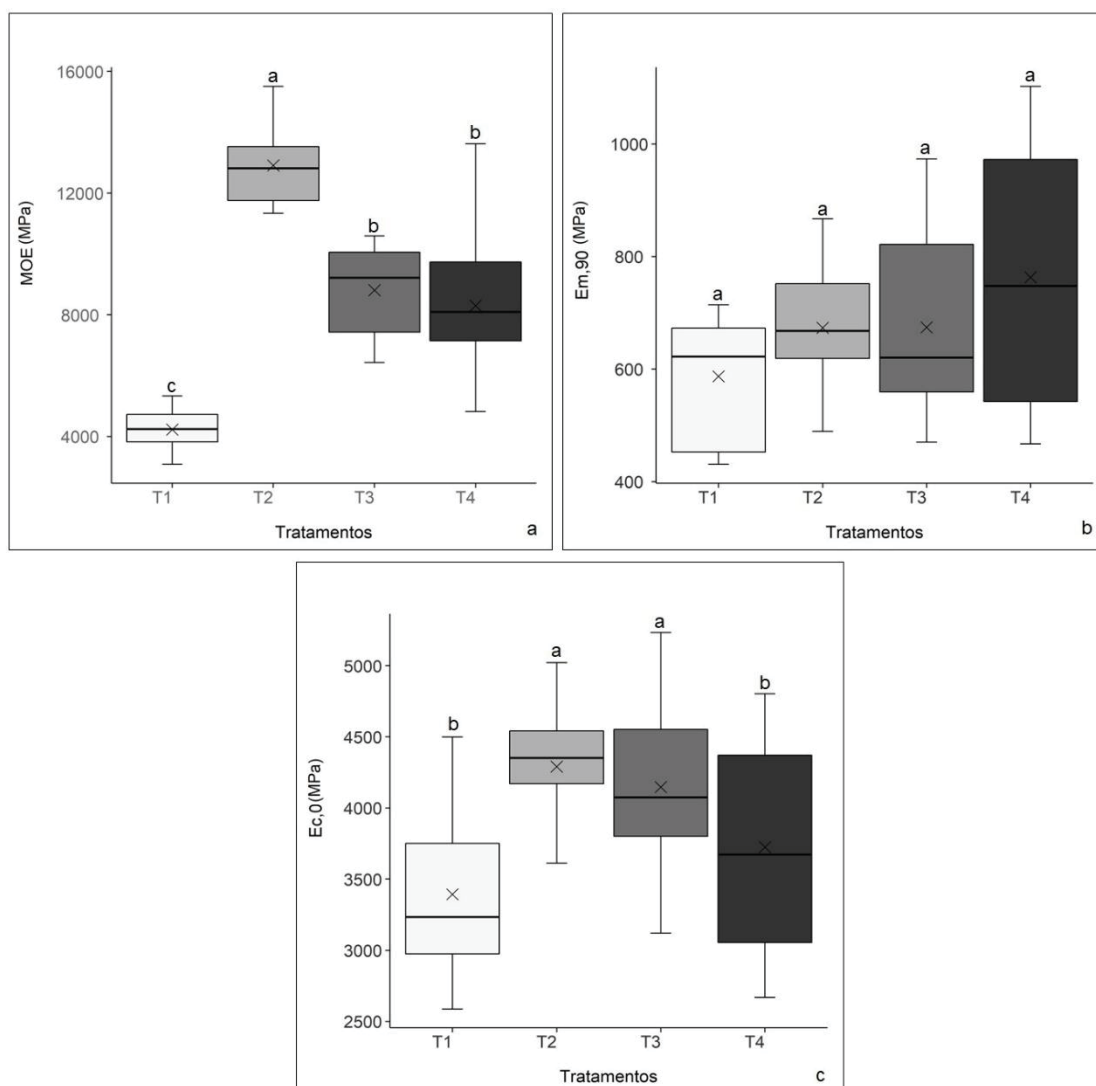
Analisando os dados da rigidez nos quatro tratamentos, se notou que a propriedade de rigidez à flexão paralela ao plano (MOE) parece ser a mais limitante com relação à classificação da qualidade do painel. Isso pode ser observado pela menor dispersão dos resultados e diferenças estatísticas. O contrário aparenta ser válido para a rigidez à flexão perpendicular ao plano, em que ocorre maior dispersão dos dados.

Com relação ao T2, composto por lamelas de classe igual ou superior a C24, nota-se que o resultado do MOE deste estudo foi superior ao valor declarado por empresas europeias. As empresas declararam valores de MOE de 12.000 MPa (ETA 06/0138, 2017; ETA 14/0349, 2019) para painéis com lamelas iguais ou superiores a C24.

O tratamento T3 e T4, também apresentaram valores superiores aos declarados pelas empresas europeias. Para painéis compostos com lamelas C16 ou superior os valores foram de 8.000 MPa (ETA 14/0349, 2019), 11.000

MPa (ETA 12/0347, 2017; ETA 11/0189, 2019) e 11.500 MPa (ETA 08/0238, 2018).

Figura 48 - Valores e comparações entre as médias de quatro tratamentos de painéis MLCC de *Pinus taeda*.



MOE – módulo de elasticidade à flexão paralelo ao plano do painel; Em_{90} – módulo de elasticidade perpendicular ao plano do painel; Ec_0 – módulo de elasticidade à compressão paralela ao plano do painel.

Fonte: A autora (2023).

O destaque parece ser do T4, que mesmo tendo sua configuração com a camada interna com lamelas classificadas com MOE entre 6.000 e 7.000 MPa (não estrutural) teve valores médios de MOE suficientes para ser enquadrado como C16, tanto pelo teste não destrutivo quanto pelo destrutivo. No entanto, devido à alta dispersão dos dados no T4, pode haver a chance de que essa

configuração de painel apresente valores menores aos estipulados nas classes de qualidade pela norma brasileira. Portanto, novos testes com essa configuração são aconselhados.

Considerando a propriedade mais limitante para a classificação, o MOE, e comparando com as ETAs se verifica que apenas o tratamento T2 teve valor maior que o declarado por empresas europeias. Esse resultado sugere que para competir no mercado internacional, a classificação das lamelas que formarão o painel MLCC é crucial. Os T3 e T4, considerados intermediários, também poderiam ser ofertados no mercado como um painel estrutural com resistências de C16 e C14.

8.3 TIPOS DE RUPTURAS

No teste de flexão paralela ao plano se observou rupturas ocasionadas por forças de tração e cisalhamento. Em alguns corpos de prova, se observou que a ruptura ocorreu por forças de cisalhamento entre o ponto de apoio do corpo de prova e o ponto de aplicação de carga. Este tipo de ruptura pode ser característico de ensaios de flexão a quatro pontos ou flexão pura (TIMOSHENKO; GERE, 1983). Na Figura 49, está ilustrado um corpo de prova de flexão rompido por forças de cisalhamento.

Figura 49 - Corpo de prova de flexão paralela ao plano do painel rompido por forças de cisalhamento na região entre os pontos de apoio e carregamento da força.



Fonte: A autora (2023).

Nos corpos de prova de compressão se observou rupturas complexas e muitas vezes mistas. As rupturas identificadas foram devido à falha de cisalhamento oblíquo, por danos de rachaduras longitudinais, danos de esmagamento na parte final do corpo de prova e eventuais quebras por presença de nós. Ressalta-se que no lado do corpo de prova, em que havia interação entre as camadas externas e interna, as rupturas foram mais

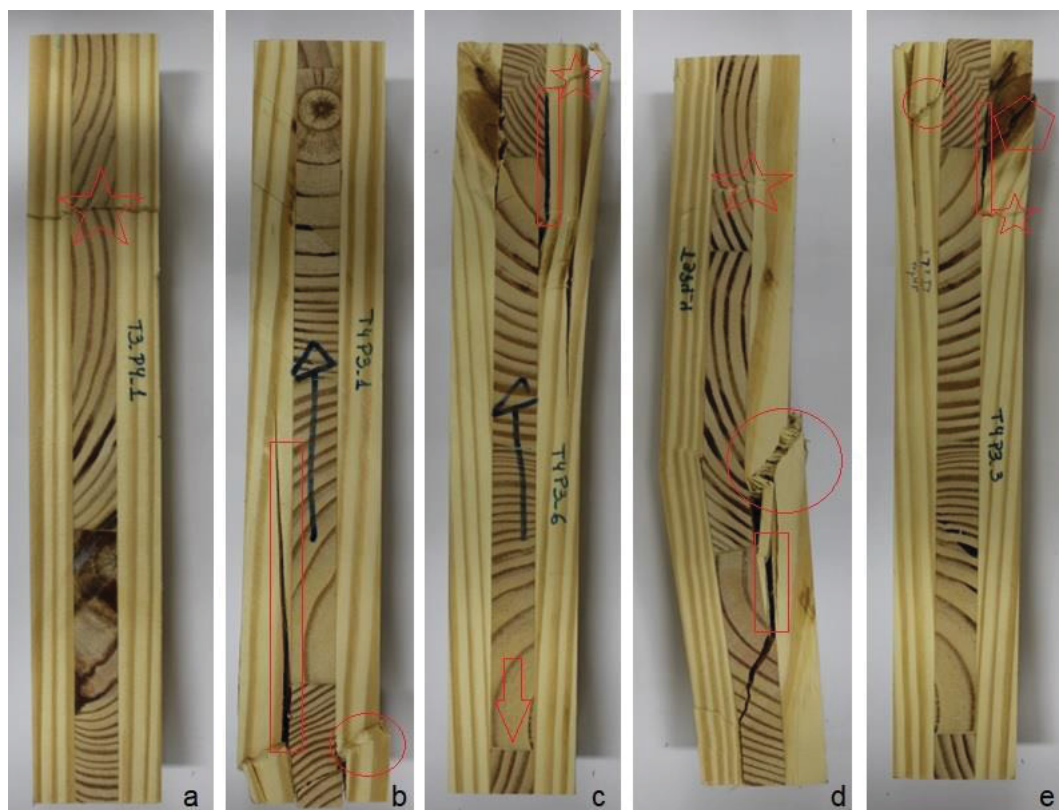
complexas do que no lado do corpo de prova em que apenas havia a camada externa. Na camada externa, normalmente ocorreu apenas um tipo de ruptura ou o dano foi ocasionado por rupturas iniciadas na área de interação entre as camadas interna e externa. Nesse último caso, as rupturas iniciaram na área de interação e durante o teste, se estenderam para o lado da camada externa do corpo de prova.

Durante os ensaios, se observou a ocorrência mais frequente de falhas por esmagamento nos corpos de prova que, na sua camada interna, tinham a união das laterais das lamelas próximas à região de aplicação de carga. Essa área da camada interna, enquanto recebia as forças de compressão, acabava aliviando essas forças na área de união com a próxima tábuas da camada interna, em seguida, o alívio passava para a camada externa, resultando em ruptura por esmagamento final.

Na Figura 50 estão ilustrados os exemplos de ruptura no lado do corpo de prova com interação entre as camadas e a seta na Figura 49c exemplifica uma dessas áreas de união entre as tábuas. Na Figura observam-se as rupturas por esmagamento final identificadas com uma estrela, rupturas por cisalhamento identificadas com um círculo, rachaduras longitudinais identificadas por retângulos e os pentágonos identificando a ruptura ocasionada por nós.

Falhas complexas em corpos de prova de compressão paralela de MLCC também foram observados por Wei *et al.* (2019). Os autores avaliaram painéis de três camadas de “*western hemlock*” (*Tsuga heterophylla*). Os autores comentaram que a ruptura por cisalhamento oblíquo e as rupturas por esmagamento foram principalmente acompanhadas por trincas longitudinais na interface de colagem. A razão atribuída ao fenômeno foi que as camadas adjacentes eram ortogonais ao aumento da tensão interna no pilar, e as deformações das camadas diferiam sob compressão axial. Isso resultou em cisalhamento das diferentes camadas, havendo uma lacuna entre as madeiras da camada transversal.

Figura 50 - Corpos de prova de compressão paralela ao plano do painel MLCC com diferentes tipos de ruptura.



Símbolo estrela – ruptura de esmagamento final; Círculo – ruptura por cisalhamento; Retângulo – rachaduras longitudinais; Pentágono – ruptura ocasionada por presença de nós.

Fonte: A autora (2023).

Na compressão perpendicular não houve rupturas. A partir da zona elástica da madeira, os corpos de prova deformaram, enquanto ocorria o esmagamento das células. Em alguns casos, após o alívio da força aplicada, os corpos de prova tiveram o retorno parcial em relação à altura inicial. Na Figura 51, está ilustrada o aspecto visual de um corpo de prova com sua deformação.

Os grandes deslocamentos e esmagamentos presentes são na maioria devidos ao fator limitante da configuração do próprio ensaio. Brandner (2018) comenta haver diferenças entre corpos de prova com toda a área superficial carregada e em corpos de prova com carregamento parcial da área superficial. Nos corpos de prova em que toda a área superficial recebe forças de compressão, não ocorre a distribuição de forças para os lados do material que não estão sendo carregados. Isso difere de corpos de prova que apenas uma

parte da área superficial recebe cargas, pois como as laterais não são submetidas às cargas, podem distribuir essas forças. Quando ocorre a distribuição de forças para as laterais, há uma maior resistência do material, e o contrário ocorre quando não há a distribuição de forças. No entanto, considerando o cálculo de projetos, menores resistências características tendem a aumentar a segurança da estrutura, por necessitar de maior área de material.

Figura 51 - Aspecto visual de um corpo de prova de MLCC de três camadas com deformação ocasionada por forças de compressão perpendicular ao plano do painel.



Fonte: A autora (2023).

O teste de cisalhamento de rolamento apresentou um bom desempenho. A maioria dos corpos de prova romperam devido a forças de cisalhamento na camada interna. Em alguns casos, houve a dispersão das forças de cisalhamento da camada interna até a área de interação entre a linha de cola das camadas interna e externa. Nesses casos, houve descolamentos parciais ou pequenas rupturas na madeira (Figura 52).

Figura 52 - Corpos de prova de cisalhamento de rolamento ensaiados à flexão de três pontos, com rupturas características de cisalhamento.



Fonte: A autora (2023).

A diversidade de falhas observadas em corpos de prova de MLCC foram comentadas por Fink *et al.* (2018). Os autores afirmam que, muitas vezes, uma quantidade relativamente grande de corpos de prova mostra diversos tipos de falhas em diferentes testes e investigações experimentais. Segundo os autores, isso ocorre pelo fato de que nem todos os parâmetros para os testes são devidamente normalizados e pela variabilidade na produção dos painéis, pois mesmo sob condições controladas o processo de produção e classificação não é perfeito.

9 CONCLUSÕES DOS PAINÉIS MLCC

Com base no estudo de quatro configurações de painéis MLCC, com três camadas, compostos por lamelas de distintas classes de resistência, diferentes resultados foram alcançados.

A classificação sistematizada das lamelas pelo MOE para a montagem dos painéis garantiu uma homogeneidade das propriedades mecânicas. Consequentemente, isso permitiu manter a qualidade das classes de qualidade delineadas, principalmente nos tratamentos com classes superiores.

Portanto, para que o padrão da qualidade fosse mantido, tanto a classificação visual quanto a classificação mecânica das lamelas que formaram o painel MLCC foram cruciais.

O controle de variáveis durante o processo se mostrou imperativo. A umidade da madeira e a sistematização das lamelas na montagem auxiliaram a garantir que as características do painel fossem adequadas para serem enquadrados nas classes de qualidade das normas brasileira e europeia.

Devido à classificação, observou-se que nos tratamentos delineados para simular a configuração de montagem praticada por empresas europeias, o resultado foi um desempenho similar ou superior aos declarados pelos produtores.

Entre as quatro configurações de painéis estudadas, duas se destacaram (T2 e T3) por apresentarem valores de rigidez e resistência iguais ou superiores ao praticados por diferentes produtores de MLCC na Europa.

Os painéis MLCC apresentaram em sua maioria, valores de resistência característicos superiores aos valores declarados por produtores de MLCC na Europa.

A propriedade de resistência à flexão se destacou devido aos altos valores característicos que superaram os declarados por produtores europeus em até 80%.

Por isso, o *Pinus taeda* apresentou potencial para o uso em MLCC visando o comércio nacional e internacional. Isso foi possível porque a classificação foi executada em todo o material e um planejamento da fabricação dos painéis ocorreu durante todo o processo.

10 CONCLUSÕES GERAIS

Com o estudo da madeira de *Pinus taeda* visando sua utilização em painéis MLCC pode-se concluir que:

Em toras de *Pinus taeda* há um cilindro central de aproximadamente 160 mm de diâmetro, cuja madeira não é indicada para a destinação estrutural. Em toras do sortimento B com diâmetro entre 350 e 450 mm, esse valor corresponde a aproximadamente 40% da área total. Assim, quanto maior o diâmetro da tora, maior área poderá ser usada, como madeira estrutural.

No sortimento B constatou-se que apenas 24,3% do rendimento total teve características estruturais. Nas toras do sortimento A, diâmetro entre 430 e 550 mm, aproximadamente 47% do rendimento total teve características para a destinação estrutural da madeira.

Para produzir a camada externa em painéis MLCC com a configuração mais exigente do padrão comercial europeu (T2), averiguou-se que quando proveniente do sortimento B, apenas 2,6% do rendimento total pode ser utilizado com esse objetivo, no sortimento A esse valor foi de aproximadamente 21%.

Para o mercado internacional (classe C24), a madeira de *Pinus taeda* deve ser proveniente de reflorestamento superiores a 24 anos. No mercado interno, a madeira poderia ser proveniente de árvores com no mínimo 18 anos.

Portanto, para produtos estruturais visando o mercado externo, a matéria-prima deve ser proveniente de rotações longas para garantir que os painéis tenham classes de qualidade superior e para haver volume suficiente de material para ser enquadrado nas classes mais restritivas da norma europeia.

No mercado interno, há a possibilidade de que a matéria-prima seja proveniente de sortimentos intermediários. Contudo, uma análise econômica deverá ser conduzida para averiguar a relação entre o rendimento e os custos.

Os painéis apresentaram desempenho satisfatório para terem potencial de substituir ou serem utilizados em conjunto (edifícios híbridos) com o concreto armado e alvenaria estrutural em edificações.

Com o rápido crescimento da espécie no Brasil e com uso das atuais tecnologias disponíveis, observa-se uma grande oportunidade competitiva.

No entanto, será imperativo a procura por madeira com características que atendam a demanda do setor estrutural. Para tal, um envolvimento entre todas as áreas do setor florestal é aconselhável para suprir esse novo mercado. Por isso, recomendam-se novos estudos, entre eles:

- A análise de toras de pequeno diâmetro ou provenientes de desbastes para estimar a quantidade de lenho juvenil presente e suas relações com as propriedades mecânicas mínimas solicitadas pelas normas vigentes;

- A definição de uma nova precificação da madeira para produtos estruturais, e.g., o impacto de adicionar um valor *premium* na madeira com melhor qualidade para o setor de construção estrutural;

- A avaliação das oportunidades e desafios da cadeia florestal para aumentar a disponibilidade de madeira visando o uso estrutural;

- Estudos silviculturais ou de melhoramento que qualifiquem o crescimento da madeira com base nas propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade.

- O desempenho e viabilidade de painéis MLCC com mais camadas, diferentes espécies, configurações de geometria, e o uso de painéis tipo OSB e compensado no miolo de MLCC;

- Estudos do comportamento e desempenho mecânico ao longo do tempo para painéis MLCC; e

- A avaliação dos painéis MLCC pela norma brasileira NBR 15575 (todas as partes) quanto ao seu desempenho e comportamento de uso em sistemas habitacionais.

REFERÊNCIAS

ADAMAPOLUS, S.; WIMMER, R.; MILIOS, E. Tracheid length- growth relationships of young *Pinus brutia* grown on reforestation sites. **IAWA Journal**, v. 33, n. 1, p. 39-49, 2012.

ANSI/APA. APA – The engineered wood association. **ANSI (APA) PRG-320**, Tacoma, Wa. 2012. 46p.

ASDRUBALI, F.; FERRACUT, B.; LOMBARDI, L.; GUATTARI, C., EVANGELISTI, L.; GRAZIESCHI, G. A review of structural thermo physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. **Building and environment**, n. 144, p. 307-332. 2017. Doi: <https://10.1016/j.buildenv.2016.12.033>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190 – 1: Projeto de estruturas em madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento.** 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190 – 2: Projeto de estruturas em madeira. Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira.** 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190 – 7: Projeto de estruturas em madeira. Parte 7: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural.** 2022c.

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

BAÑO, V.; GODOY, D.; FIGUEIREDO, D.; VEGA, A. Characterization and structural performance in bending of CLT panels made from small-diameter logs of loblolly/slash pine. **Materials**, v. 11, n. 12, p. 2436, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11122436>.

BARATTO, R. Triptyque divulga projeto de edifício escalonado de madeira certificada na Vila Madalena. Arch Daily, 2017. Disponível em: <https://archdaily.com.br/br/879936/triptyque-divulga-projeto-de-edificio-escalonado-de-madeira-certificada-na-vila-madalena>. Acesso em: 04 de abril de 2022.

BENDTSEN, B.A. Properties of wood improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, v.28, n.10, p. 61-71, 1978.

BRAHAM, A., CASILLAS, S. **Fundamentals of sustainability in civil engineering**. CRCPress: 272p. 2021.

BIASI, C.; ROCHA, M.P. **Rendimento em serraria de *Pinus elliottii***. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003. 12 p.

BRANDNER, R. Production and technology of cross laminated timber (CLT): a state-of-the-art report. In: Focus Solid Timber Solutions European conference on cross laminated timber (CLT), 2013, Graz, Austria. **Anais...** Bath: University of Bath, 2013. p. 3-36.

BRANDNER, R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products. **Engineering Structures**, v. 171, p. 944-960, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.076>

BRANDNER, R.; DIETSCH, P.; DRÖSCHER, J.; SCHULTE-WREBE, M.; KREUZINGER, H.; SIEDER, M. Cross laminated timber (CLT) diaphragms under shear: test configuration, properties and design. **Construction and building materials**, n. 147, p. 312-327, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.153>

BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G.; THIEL, A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. **Eur. J. Wood Products**, v.74, p.331-351, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

CAO, Y.; STREET, J.; LI, M.; LIM, H. Evaluation of the effect of knots on rolling shear strength of cross laminated timber (CLT). **Construction and building materials**, v. 222, p. 579-587, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.165>

CENNI DI CAMBIAMENTO. Cenni di cambiamento. Disponível em: <https://cennidicambiamento.it>. Acesso em: 23 de março de 2022.

COSTA, A.A.P. **Construção de edifícios com *cross laminated timber* (CLT)**. 2013. 129p. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2013.

CROSSLAM. CLT: *Cross laminated timber*. Disponível em: <https://crosslam.com.br/site/clk>. Acesso em 06 de setembro de 2018.

DESIGN BUILD NETWORK, 2019. Mjosa Tower (Mjøstarnet). Disponível em: <https://designbuild-network.com/projects/mjosa-tower.mjostarnet/>. Acesso em: 23 de março de 2022.

DONG, Y.; CUI, X.; YIN, X.; CHEN, Y.; GUI, H. Assessment of energy saving potential by replacing conventional materials by cross laminated timber (CLT): a case of study of office buildings in China. **Applied Sciences**, v. 9., n.5, p. 858. 2019.

EHRHART, T.; BRANDNER, R. Rolling shear: test configuration and properties of some European soft and hardwood species. **Engineering Structures**, v. 172, p. 554-572, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.118>

EHRHART, T.; BRANDNER, R.; SCHICKHOFER, G.; FRANGI, A. Rolling shear properties of some European timber species with focus on cross laminated timber (CLT): test configuration and parameter study. In: International Network on timber engineering research, 48, p.61-76, 2015, Sibenik. **Proceedings...** Sibenik, Croatia, 2015.

ESPINOZA, O.; TRUJILLO, V.R.; MALLO, M.F.L.; BUEHLMANN, U. Cross-laminated timber: status and research needs in Europe. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 281-295. 2016.

ETA 06/0138. **KLH-Massuvholz platen/ KLH-solid wood slab**: Solid wood slab elements to be used as structural elements in buildings. KLH Massivholz GmbH, Austrian Institute of construction engineering, 2017.

ETA 08/0238. **Schilliger Grossformatplatte GFP/Crosslam**: Solid wood slab elements to be used as structural elements in buildings. Schilliger Holz-Industrie AG, Eurofins Expert Services, 2018.

ETA 11/0189. **Derix X-Lam**: Massives plattenförmiges holzbauerelement zur verwendung als tragendes bauteil (in bauwerken. W.u. J. Derix GmbH & Co, Deutsches Institute für Bautechnik, 2019.

ETA 12/0347. **XLAM Dolomiti CLT**: Solid wood slab elements to be used as structural elements in buildings. X-Lam Dolomiti S.r.l, Austrian Institute of construction engineering, 2017.

ETA 14/0349. **CLT – Cross Laminated timber: Solid wood slab elements to be used as structural elements in buildings**. Stora Enso Wood Products OY Ltd, Austrian Institute of construction engineering, 2019.

ETA 16/0115. **X Panel**: Multilayered timber elements for walls, ceilings, roofs, and special construction components. Gaujas Koks Ltd, Deutsches Institute für Bautechnik, 2018.

EUROPEAN ASSESSMENT DOCUMENT – **EAD 130005-00-0304**. Solid wood slab elements to be used as a structural element in buildings. EOTA, 14 p. 2015

EUROPEAN ORGANIZATION FOR TECHNICAL ASSESSMENT – EOTA.
<https://www.eota.eu/en-GB/content/home/2/185/>. Acesso: 29 agosto, 2019.

EUROPEAN STANDARD. **EN 338**: Structural timber – strength classes. United Kingdom, 16 p. 2016.

EUROPEAN STANDARD. **EN 408**: Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – determination of some physical and mechanical properties. United Kingdom, 42 p. 2012.

EUROPEAN STANDARD. **EN 1995-1-1**: Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1 – 1: General – common rules and rules for buildings. United Kingdom, 2004.

EUROPEAN STANDARD. **EN 14080**: Timber structures – glued laminated timber – requirements. United Kingdom, 2013.

EUROPEAN STANDARD. **EN 14081-1: Timber structures – strength graded structural timber with rectangular cross section** – Part 1: General requirements. United Kingdom, 42 p. 2016.

EUROPEAN STANDARD. **EN 15497: Structural finger jointed solid timber:** performance requirements and minimum production requirements. United Kingdom, 2014.

EUROPEAN STANDARD. **EN 16351:** Timber structures: cross laminated timber: requirements. United Kingdom, 2015.

FERRARO, M. House sociale: un nuovo complesso di Via Cenni a Milano, 10 p. março 2013. Rivista Il Nuovo Contiere.

FINK, G.; KOHLER, J.; BRANDNER, R. Application of european design principles to cross laminated timber. **Engineering structures**, v. 171, p. 934-943, 2018.

FPL, Forest Products Laboratory. **Wood handbook: wood as an engineering material**. General Technical Report FPL- GTR-190, 2010: 509 p.

FRIHART, C.R.; HUNT, C.G. **Adhesives with wood materials:** bond formation and performance. Madison: Forest Service, 2010, Chap. 10 (USDA FPL General Technical Report, 190).

GONÇALVES, F.G.; SEGUNDINHO, P.G.A.; SCHAUDER, L.F.; TINTI, V.P.; SANTIAGO, S.B. Avaliação da Resistencia ao cisalhamento da madeira de *Pinus* sp. coladas em temperatura ambiente. **Ciência da Madeira**, v. 7, n. 1, p. 42-50, 2016. DOI: 10.12953/2177-830/rcm.v7n1p42-50

GU, H.; BERGMAN, R. Life cycle assessment and environmental building declaration for the design building at the University of Massachusetts. **General Technical Report FPL-GTR-255**. Madison, WI. US Department of agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 73 p. 2018.

GÜLZOW, A.; RICHTER, K.; STEIGER, R. Influence of wood moisture content on bending and shear stiffness of cross laminated timber panels. **Eur. J. Wood Prod.**, n. 69, p. 193-197, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0416-z>

HE, M.; SUN, X.; LI, Z.; FENG, W. Bending, shear, and compressive properties of three-and five-layer cross-laminated timber fabricated with black spruce. **Journal of wood science**, v. 36, n. 38, p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01886-z>

HINDMAN, D.P.; BOULDIN, J.C. Mechanical properties of southern pine cross laminated timber. **J. Materi. Civ. Eng.**, v. 27, n. 9, 04014251, 2015.

HOSSEINZADEH, S.; MOHEBBY, M.; ELYASI, M. Bending performances and rolling shear strength of nail-cross-laminated timber. **Wood Material Science and Engineering**, v.17, n.2, p. 1-8, 2020. DOI: <https://10.1080/17480272.2020.1800089>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION- **ISO 3129**. Wood: Sampling Methods and General Requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. 8p. Geneva, Switzerland, 2019.

IZZY, M.; CASAGRANDE, D.; BEZZY, S.; PASCA, D.; FOLLESA, M.; TOMASI, R. Seismic behavior of cross laminated timber structures a state-of-the-art review. **Engineering Structural**, v. 170, p. 42-52, 2018.

KARACABEYLI, E. (ed). **CLT handbook: cross laminated timber**. Point-Claire (QC): FPIInnovations, 2013.

KLIPPEL, M.; SCHMID, J. Design of cross laminated timber in fire. **Structural Engineering International**, v. 27, n. 2, p. 224-230. 2017. DOI: <https://10.2749/101686617X14881932436096>.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.; NIGOSKI, S.; BITTENCOURT, E. Características dos traqueóides da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* HE Moore e *Pinus taeda* L. In: Congresso ibero-americano de investigación en celulosa y papel, 2002, **Anais...** 2002.

KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of wood science and technology** – II-Wood based material. Berlin: Springer-Verlag, 1975.

KRAMER, A.; BARBOSA, A.R.; SINHA, A. Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross laminated timber applications. **Journal of Materials in civil engineering**, v. 26, n. 7, 06014009. 2014. DOI: [https://10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000936](https://10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000936).

LAN, K.; KELLY, S.S.; PRAKASH NEPAL, Y.Y. Dynamic life cycle carbon and energy analysis for cross-laminated-timber in the southern stern United States. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 12, 124036, 2020. DOI: <https://10.1088/1748-926/abc5e6>

LARSON, P.R.; KRETSCHMANN, D.E.; CLARK III, A.; ISEDRANDS, J.G. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis**. General Technical Report FPL-GTR-129, 2001, Madison, Wisconsin, 42p.

LEITE, T.M.; SANCHEZ, J.M.M.; BLUMENSCHHEIN, R.N. O processo produtivo de painéis em cross laminated timber: potencialidades e desafios de implantação na construção civil brasileira. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 16. 2018. São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2018.

LI, M. Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated-timber by short-span bending tests and modified planar shear tests. **Journal of Wood Science**, v. 63, p. 331-337, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1631-6>.

LI, M.; DONG, W.; LIM, H. Influence of lamination aspect ratios and test methods on rolling shear strength evaluation of cross laminated timer. **Journal of Materials in civil engineering**, v. 31, n. 12, 2019.

LIU, Y.; GUO, H.; SUN, C.; CHANG, W.S. Assessing cross laminated timber (CLT) as an alternative material for mid-rise residential buildings in cold regions in China – A life cycle assessment approach. **Sustainability**, v. 8, n. 10, p. 1047, 2016. DOI: <https://10.3390/su8101047>

LUCENA, R; TEREZO, R.; VALLE, A.; RIGHEZ, J.; MOTTA, G. Confecção e análise de rigidez de painéis de madeira laminada colada cruzada de *Pinus taeda*. **Brazilian Journal of Technology**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 439-452, 2019.

MÄKINEN, H.; JYSKE, T.; SARANPÄÄ, P. Variation of tracheid length within annual rings of scots pine and Norway spruce. **Holzforschung**, v. 62, p. 123-128, 2008.

MALAN, F.S. Corewood in South African pine: necessity and opportunities for improvement. **South For.**, v. 72, n. 2, p. 99-105, 2010.

MALO, M.F.L.; ESPINOZA, O.A. Outlook for cross laminated timber in the United States. **BioResources**, v. 9, n. 4, p. 7427-7443. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.7427-7443>.

MUSTEFAGA, E.C.; HILLIN, E.; TAVARES, E.L.; SOZIM, P.C.L.; RUSCH, F. Caracterização física-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*. **Scientia forestalis**, v. 47, n. 123, p. 472-481, 2019.

PALERMO, G.P.; 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.

PASSARELLI, R.N. **Cross laminated timber: diretriz para projeto de painel maciço em madeira no estado de São Paulo**. 2013. 192 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PINA, J.C.; FLORES, E.I.S.; SAAVECHA, K. Numerical study of cross laminated timber walls subject to compression. **Construction and building materials**, v. 199, p. 82-91, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.013>

PEREIRA, M.C.M.; CALIL JUNIOR, C. Strength and stiffness of cross laminated timber (CLT) panels produced with *Pinus* and Eucalyptus: Experimental and analytical comparisons. **Matéria**, Rio de Janeiro, n. 24, v. 2, 2019.

PLACKER, H. Brettsperholz wächst global. 2015. Disponível em: https://holzkurier.com/schnittholz/2015/02/brettsperholz_wachstglobal.html. Acesso em: 28 de março de 2022.

SANBORN, K.; GENTRY, T.R.; KOCH, Z.; VALKENBURG, A.; CONLEY, C.; STEWART, L.K. Ballistic performance of cross laminated timber (CLT). **International Journal of impact engineering**, v. 128, p. 11-23, 2019.

SANTIAGO, W. Primeiro difícil multipisos em madeira do Brasil é inaugurado. ARQ XP, 2020. Disponível em: arqxp.com/primeiro-edificio-multipisos-em-madeira-do-brasil-e-inaugurado/. Acesso em: 04 de abril de 2022.

SCHMID, J.; KLIPPEL, M.; JUST, A.; FRANGI, A.; TISO, M. Simulation of the fire resistance of cross-laminated timber (CLT). **Fire Technology**, pp. 1-36, 2018.

SERPA, P.N.; VITAL, B.R.; LUCIA, R.M.D.; PIMENTA, A.S. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliotti*. **Revista Cerne**, v. 27, n. 5, p. 723-733, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000500015>

SHARIFNIA, H.; HINDMANM, D.P. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of southern yellow pine cross laminated timbers. **Construction and Building Materials**, n. 156, p. 314-320, 2017.

SIKORA, K.S.; McPOLIN, D.O.; HARTE, A.M. Effects of the thickness of cross laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. **Construction and building materials**, v.116, p. 141-150, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145>

SOUZA, R.C.; GIOVANINI, J.N. Efeito da idade e da posição radial na densidade básica e dimensão dos traqueóides da madeira de *Pinus taeda* L. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 119-127, 2007.

STAUDER, C. **Cross laminated timber: an analysis of the Austrian industry and ideas for fostering its development in America**. Austrian Marshall Plan Foundation, p. 36, 2013.

TEREZO, R.F.; ROSA, T.O.; BOURSCHEID, C.B.; SAMPAIO, C.A.P.; JUHN, L.S.; JACINTO, R.C. Comparação do custo de produção de painel CLT produzido artesanalmente com outros materiais de construção convencionais. **Brazilian Journal of development**, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 68584-68590, 2020.

TIMOSHENKO, S.P.; GERE, J.E. **Mecânica dos sólidos**: volume 1. LTC – Livros Técnicos e científicos, Rio de Janeiro, 1983.

TRIPTYQUE ARCHITECTURE. Amata Urban Forest. Triptyque 2022. Disponível em: https://trptyque.com/en/project/amata-3/#pll_switcher.

TROVATI, L.R.; FERRAZ, M.E.S.B. Influência da precipitação e da temperatura na densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa*. IPEF, n. 26, n. 26, p. 31-36, 1984.

VESSBY, J.; ENQUIST, B.; PETERSON, H.; ALSMARKER, T. Experimental study of cross laminated timber walls panels. **European Journal Wood Products**, v. 67, p. 211-218, 2009.

VIDAURRE, G.B.; LOMBARDI, L.R.; OLIVEIRA, J.S.; ARANTES, M.D.C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2011.066>

VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de cross laminated timber submetidos à flexão**. 2020. 249f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

VILELA, R.; MASCIA, N.T. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* provenientes de placas de cross laminated timber. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 89-110, 2021.

VIVIAN, M.A.; SEGURA, T.E.S.; BONFATTI JUNIOR, E.A.; SART, C.; SCHMIDT, F.; SILVA JUNIOR, F.G.; GABOV, K.; FARDIM, P. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 183-191, 2015.

WAUGHT, A.; WELLS, M.; LINDEGAR, M. Tall timber Buildings: application of solid timber construction in multi-storey buildings. In: Proceedings of the International Convention of Society of wood Science and technology and United Nations Economic Commission for Europe- Timber Committee. 2010, Geneva, Switzerland. **Anais...** Geneva, 2010, p. 11-14.

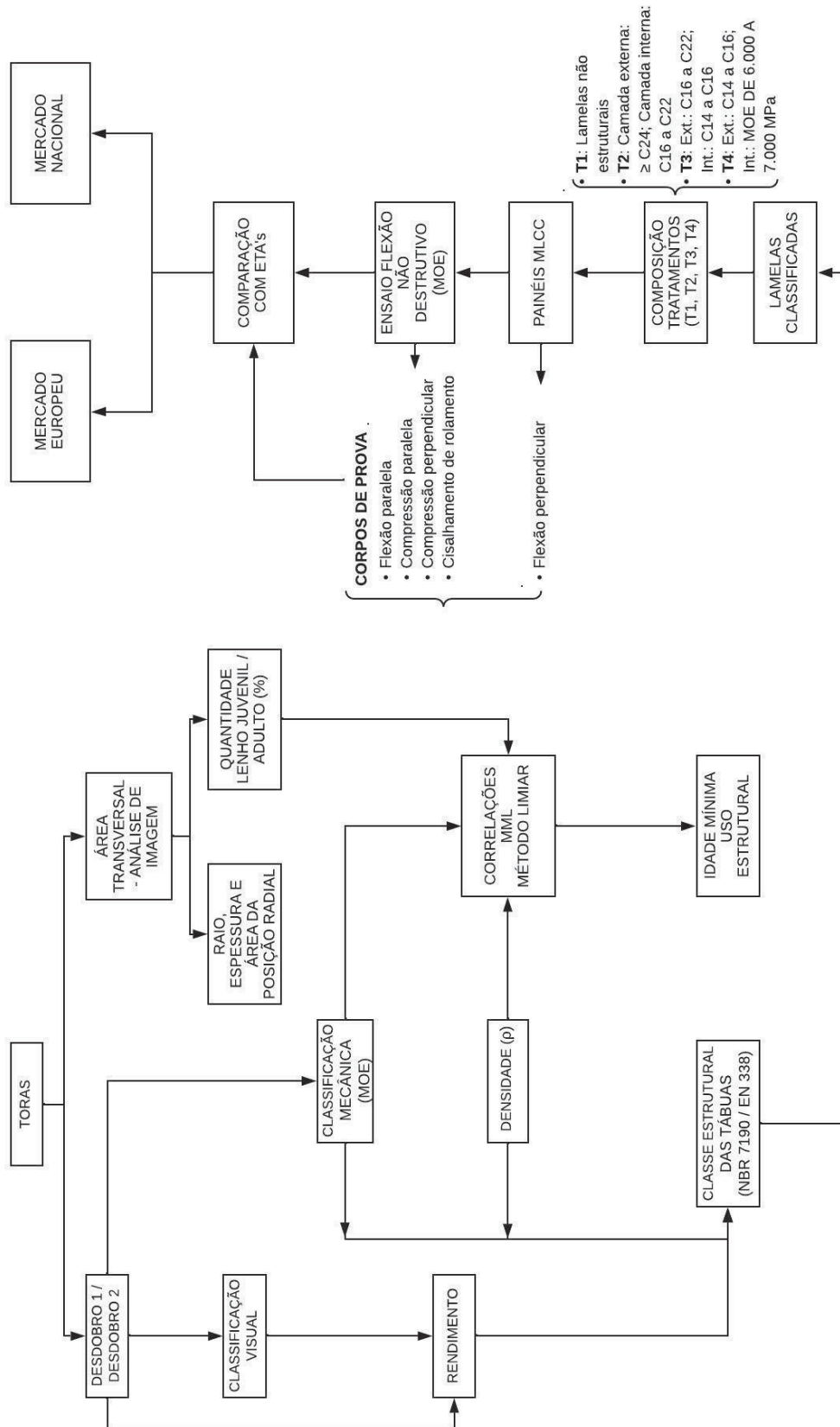
WEI, R.; WANG, B.J.; LI, H.; WANG, L.; PENG, S.; ZHANG, L. A comparative study of compression behaviors of cross-laminated timber and glued-laminated timber columns. **Constructions and building materials**, v. 222, p. 86-95, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmate.2019.06.139>

WESSELS, C.B.; MALAN, F.S.; SEIFERT, T.; LOUW, J.H.; RYPSTRA, T. The prediction of the flexural lumber properties from standing South African-grown *Pinus patula* trees. **European J. Forests Res.**, v. 134, p. 1-18, 2015.

WIMMER, R. Intra-annual cellular characteristics and their implications for modelling softwood density. *Wood and Fiber Science*, v. 24, n. 4, p. 413-420, 1995.

ZOBEL, B.J., SPRAGUE, J.R. **Juvenile wood in forest**. Berlin: Heidelberg, 1998.

APÊNDICE 1 – DIAGRAMA DAS ETAPAS EXECUTADAS NOS MATERIAIS E MÉTODOS



APÊNDICE 2 – VALORES MÉDIOS DO MOE EM CINCO POSIÇÕES RADIAIS PARA OBTENÇÃO DOS LIMITES PELO MÉTODO LIMIAR

Valores médios do MOE em cinco posições radiais provenientes do sortimento

A.

% lenho	P_{,1}	P_{,2}	P_{,3}	P_{,4}	P_{,5}
0	12554	11988	9123	9200	10601
10	10227	11281	10762	11389	13209
20	9002	9070	11053	11845	13447
30	9606	9310	11477	11769	11628
40	8441	10668	10856	12280	12680
50	7650	10899	12280	11943	12343
60	8534	10198	12677	13006	13325
70	8037	10817	14021	14129	11378
80	7524	10403	11059	12744	12572
90	6785	9373	13219	13992	13333
100	6313	9651	13750	12767	9650

Valores médios do MOE em cinco posições radiais provenientes do sortimento

B.

% lenho	P_{,1}	P_{,2}	P_{,3}	P_{,4}	P_{,5}
0	7750	8460	10255	6096	6510
10	5645	6220	6291	5918	7967
20	7088	7195	6577	7667	9891
30	6771	6492	6908	8494	9058
40	5695	5861	6458	6942	
50	5835	6146	8104	9822	
60	5608	7491	6144	7311	
70	5225	4352	6683	10168	
80		5159	10699		
90			6799		
100					

Valores médios do MOE em cinco posições radiais provenientes do sortimento

C.

% lenho	P₁	P₂	P₃	P₄
0	6571	5481	5474	5762
10		6337		6749
20	4835	5918		5094
30	4559	6402	7163	
40		5702	7084	
50	6316	6639		
60	5264	7232	6538	
70	5994	5203		
80	4594		7150	
90	4938			
100		5468		

APÊNDICE 3 – RESULTADOS DAS ANOVAS PARA OS MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR AJUSTADOS PARA A DENSIDADE E MOE.

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo p_1 entre a presença de Posição na tábua em porcentagem e a densidade para o Sortimento A.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	10	420111	42011	21,0439	0,0000
Resíduo	691	1532752	2218		
Total	701	1952863			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (p_1) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	536,7	77,28	0,0000
RB	-54,3	-6,60	0,0000
RBO	-46,9	-5,55	0,0000
RBOG	-34,9	-3,55	0,0004
RBOGY	-0,8	-0,03	0,9748
BO	-18,4	-2,07	0,0386
BOG	-4,4	-0,52	0,6012
BOGY	0,0	65535,0	-
OG	-0,7	-0,08	-
OGY	14,5	1,70	0,0900
GY	3,3	0,36	0,7208

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo p_2 entre a quantidade de cada posição na tábua em porcentagem e a densidade para o Sortimento A.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	10	435914	43591	19,8280	0,0000
Resíduo	690	1516949	2198		
Total	700	1952863			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (p_2) com o valor de p nível de significância α 0,05

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	498,86	33,28	0,0000
RB	-0,17	-1,08	0,2822
RBO	-0,07	-0,73	0,4679
RBOG	-0,02	-0,25	0,8029
RBOGY	0,28	1,12	0,2628
BO	0,20	1,30	0,1953
BOG	-0,09	-0,86	0,3924
BOGY	-0,02	-0,21	0,8316
OG	0,38	2,46	0,0141
OGY	-0,07	-0,67	0,5030
GY	0,40	2,56	0,0106

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo MOE_1 entre a presença de Posição na tábua em porcentagem e o MOE para o Sortimento A.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	10	2157546416	215754642	18,5151	0,0000
Resíduo	726	9399989651	12947644		
Total	736	11557536067			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (MOE_1) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	10400,7	20,2	0,0000
RB	-2555,8	-4,2	0,0000
RBO	-868,6	-1,4	0,1674
RBOG	0,0	65535,0	-
RBOGY	1432,9	0,8	-
BO	1414,1	2,2	0,0314
BOG	1602,9	2,6	0,0098
BOGY	719,5	1,0	0,3202
OG	1780,2	2,7	0,0072
OGY	2787,6	4,4	0,0000
GY	1533,4	2,3	0,0246

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo MOE₂ entre a quantidade de cada posição na tábua em porcentagem e o MOE para o Sortimento A.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	10	2211126807	221112681	17,1280	0,0000
Resíduo	723	9333497803	12909402		
Total	733	11544624610			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (MOE₂) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	10155,2	8,9	0,0000
RB	-23,1	-1,9	0,0523
RBO	2,6	0,4	0,7240
RBOG	2,5	0,3	0,7295
RBOGY	20,5	1,1	0,2894
BO	17,5	1,5	0,1336
BOG	-11,2	-1,5	0,1410
BOGY	-12,7	-1,7	0,0863
OG	21,9	1,9	0,0598
OGY	0,6	0,1	0,9385
GY	15,7	1,3	0,1860

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo p_1 entre a presença de Posição na tábua em porcentagem e a densidade para o Sortimento B.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	8	81029	10129	6,1849	0,0000
Resíduo	103	168677	1638		
Total	111	249707			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (p_1) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	620,7	34,3	0,0000
RBO	-95,5	-4,9	0,0000
RBOG	-90,8	-4,5	0,0000
RBOGY	-98,7	-3,9	0,0002
BO	-55,8	-2,1	0,0422
BOG	-56,7	-2,7	0,0090
BOGY	-58,7	-2,7	0,0076
OG	-55,6	-2,4	0,0178
OGY	-31,8	-1,5	0,1483

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo p_2 entre a quantidade de cada posição na tábua em porcentagem e a densidade para o Sortimento B.

	G.L.¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	10	87262	8726	5,4255	0,0000
Resíduo	101	162444	1608		
Total	111	249707			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (p_2) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	513,2	13,8	0,0000
RB	0,1	0,1	0,9123
RBO	-0,2	-0,2	0,8258
RBOG	0,0	-0,2	0,8139
RBOGY	-0,2	-0,7	0,4991
BO	0,4	1,1	0,2909
BOG	-0,2	-0,6	0,5450
BOGY	0,0	-0,1	0,8937
OG	0,5	1,4	0,1679
OGY	-0,4	-1,5	0,1257
GY	1,1	2,7	0,0087

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo MOE₁ entre a presença da posição na tábua em porcentagem e o MOE para o Sortimento B.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	9	188398030	20933114	7,7267	0,0000
Resíduo	102	276336662	2709183		
Total	111	464734692			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (MOE₁) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	6342,7	13,9	0,0000
RBO	-924,9	-1,7	0,0991
RBOG	851,3	1,4	0,1753
RBOGY	-223,3	-0,3	0,7971
BOGY	1116,4	1,7	0,1009
BOG	759,2	1,2	0,2424
BO	-383,7	-0,4	0,6844
OG	1713,6	2,3	0,0225
OGY	2791,3	4,1	0,0001
GY	3659,1	4,2	0,0001

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo MOE₂ entre a quantidade de cada Posição na tábua em porcentagem e o MOE para o Sortimento B.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	10	185744746	18574475	6,7243	0,0000
Resíduo	101	278989947	2762277		
Total	111	464734692			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (MOE₂) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	8257,7	5,4	0,0000
RB	-37,4	-0,7	0,4639
RBO	17,4	0,4	0,6661
RBOG	3,8	0,5	0,6528
RBOGY	-12,8	-1,3	0,2000
BOGY	-3,3	-0,4	0,6984
BOG	10,4	1,0	0,3290
BO	-24,1	-1,5	0,1324
OG	-1,0	-0,1	0,9509
OGY	-3,1	-0,3	0,7845
GY	16,7	1,0	0,3110

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo p_1 entre a presença de Posição na tábua em porcentagem e a densidade para o Sortimento C.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	4	51703	12926	6,9460	0,0002
Resíduo	40	74435	1861		
Total	44	126138			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (p_1) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	487,3	19,6	0,0000
RB	-0,3	0,0	0,9910
RBO	56,8	1,9	0,0700
BOG	85,2	3,0	0,0046
BO	36,6	1,3	0,2046

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo p_2 entre a quantidade de cada posição na tábua em porcentagem e a densidade para o Sortimento C.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	5	52452	10490	5,5523	0,0006
Resíduo	39	73686	1889		
Total	44	126138			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (p_2) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	444,3	6,3	0,0000
RB	0,4	0,6	0,5533
BO	0,8	1,1	0,2771
OG	0,4	0,7	0,5131
RBO	0,1	0,1	0,8881
BOG	0,3	0,6	0,5755

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo MOE₁ entre a presença de Posição na tábua em porcentagem e o MOE para o Sortimento C.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	5	36065502	7213100	1,9162	0,1137
Resíduo	40	188209826	4705246		
Total	45	224275328			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (MOE₁) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-p
Interseção	6028,2	4,8	0,0000
RB	-653,3	-0,5	0,6348
RBO	-73,6	0,0	0,9620
BOG	1702,8	1,2	0,2401
BO	-231,1	-0,2	0,8723
OG	0,0	65535,0	-

ANOVA para a regressão linear múltipla do modelo MOE₂ entre a quantidade de cada posição na tábua em porcentagem e o MOE para o Sortimento C.

	G.L¹	SQ²	QM³	F	F de significação
Regressão	5	46969681	9393936	2,0663	0,0905
Resíduo	39	177305647	4546299		
Total	44	224275328			

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

Coefficientes da regressão (MOE₂) com o valor de p nível de significância α 0,05.

	Coefficientes	Stat t	valor-P
Interseção	1749,3	0,6	0,5720
RB	36,2	1,2	0,2526
RBO	-20,5	-0,9	0,3731
BOG	-8,1	-0,4	0,6881
BO	39,7	1,3	0,2059
OG	45,7	1,5	0,1336

APÊNDICE 4 - RESULTADOS ANOVA FLEXÃO DESTRUTIVA.

ANOVA do teste de Tukey para o modulo de elasticidade a flexão destrutiva a quatro pontos.

ANOVA	G.L. ¹	SQ ²	QM ³	Estatística F	P-valor
Fator	4	1431177919	35794479,7	17,6373	0,0000
Resíduo	99	200917514,6	2029469,8		

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

ANOVA do teste de Tukey para a resistência à flexão destrutiva à quatro pontos.

ANOVA	G.L. ¹	SQ ²	QM ³	Estatística F	P-valor
Fator	4	44069798,65	11017449,7	21,4382	0,0000
Resíduo	95	48822171,6	513917,6		

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

ANOVA do teste de Tukey para a variação do módulo de elasticidade em relação a inclinação do anel e a aplicação da carga no teste de flexão destrutivo à quatro pontos.

ANOVA	G.L. ¹	SQ ²	QM ³	Estatística F	P-valor
Fator	6	50268220,84	8378036,81	2,8437	0,0135
Resíduo	98	288722117,9	2946144,06		

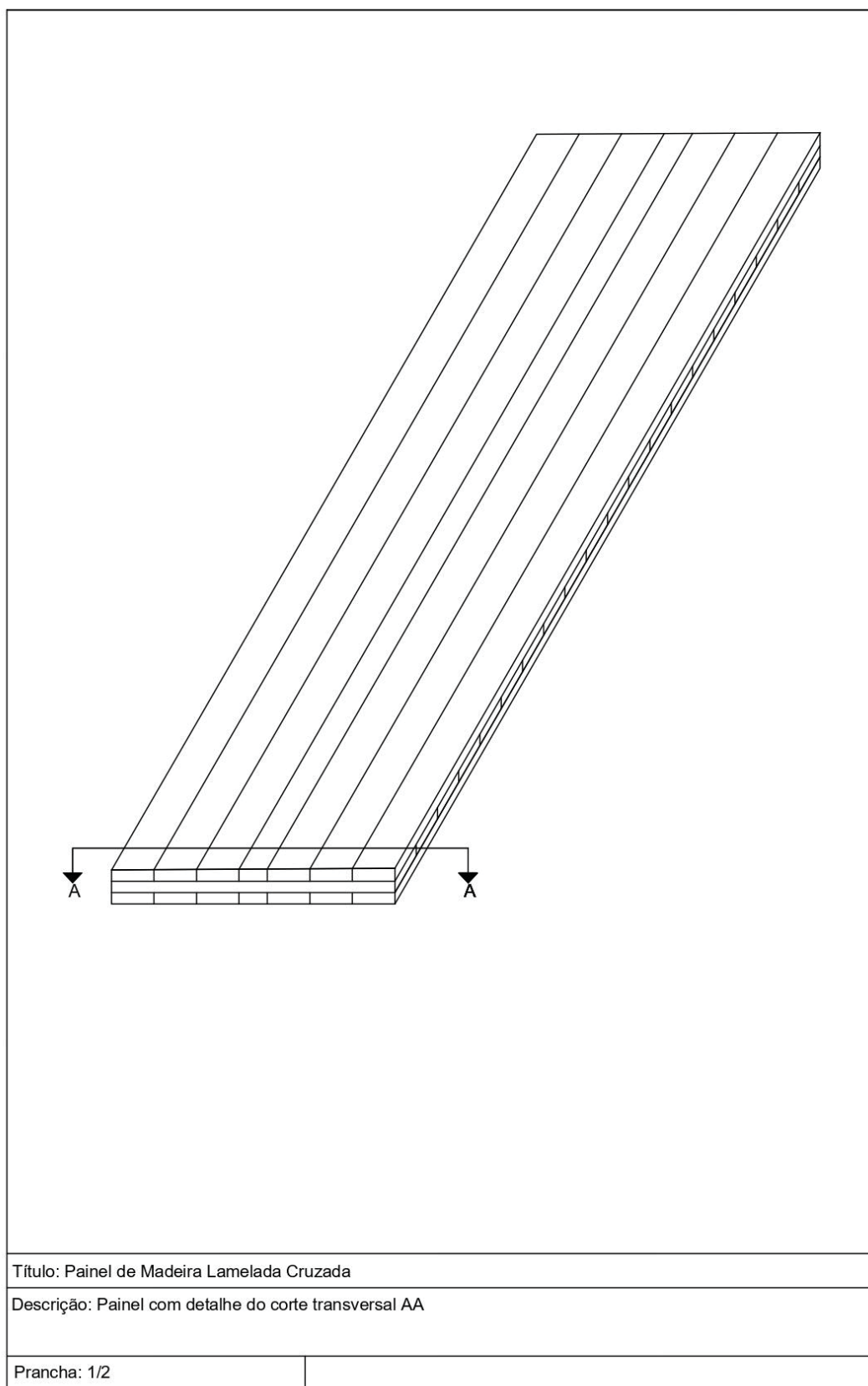
¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

ANOVA do teste de Tukey para a variação do módulo de ruptura em relação a inclinação do anel e a aplicação da carga no teste de flexão destrutivo à quatro pontos.

ANOVA	G.L. ¹	SQ ²	QM ³	Estatística F	P-valor
Fator	6	3301,33	550,22	2,4377	0,0307
Resíduo	98	22120,03	225,71		

¹ Graus de liberdade; ² Soma dos quadrados; ³ Quadrado médio.

**APÊNDICE 5 – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS PAINÉIS MLCC DE TRÊS
CAMADAS.**



			Sem classificação			
			Sem classificação			
			Sem classificação			

Tratamento 1

			> C24			
			C16 a C22			
			> C24			

Tratamento 2

			C16 e C22			
			C14 e C16			
			C16 e C22			

Tratamento 3

			C14 e C16			
			MOE 6.000 - 7.000			
			C14 e C16			

Tratamento 4

Título: Painel de Madeira Lamelada Cruzada

Descrição: Corte transversal AA

Prancha: 2/2

APÊNDICE 6. MOE DAS LAMELAS DOS PAINÉIS CLT

Tratamento	Painel	ID	% Lenho					MOE MPa
			P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	
T1 (não estrutural)	P1 (externa)	C20	46	23	23	8		4.495
		C3	47	26	20	8		5.603
		D16	53	23	18	6		5.991
		B2	38	43	18			4.505
		B5	47	42	11			3.937
		A18	10	69	21			4.898
		I5	60	40				5.331
	P1 (interna)	J7	47	53				5.700
		J6	84	16				4.586
		E1	63	28	9			5.503
		D6	25	26	27	21	2	5.883
		I6		12	68	20		4.356
		G4	18	82				3.687
		J1		63	33	5		5.169
	P1 (externa)	B12	39	44	17			4.736
		A8	42	40	18			5.082
		I3	29	68	3			4.402
		B6	41	45	14			4.942
		B22			57	33	9	5.480
		J5		65	35			3.625
		G1		65	35			4.949
T1 (não estrutural)	P2 (externa)	J9	83	17				4.226
		H9	66	34				5.923
		G2		77	23			4.278
		C18		1	63	34	1	2.978
		A13		52	43	5		5.715
		H6	69	31				5.269
		F4	47	51	2			5.855
	P2 (interna)	J10	75	25				3.458
		G7	60	40				5.039
		H3	87	13				4.363
		A5	50	34	16			4.578
		J10						5.448
		G6		20	80			3.687
		G4	18	82				3.687

T1 (não estrutural))	P2 (externa)	J8			78	22		5.581
		B17	52	38	11			5.731
		C15	38	24	26	13		5.280
		C13	5	34	30	22	9	5.763
		B16	57	35	8			5.753
		B21		16	64	19	1	5.956
		C1	62	21	17			4.479
		G9	15	85				5.133
	P3 (externa)	Q6		79	21			5.552
		I2		70	30			4.869
		V24	68	32				5.475
		I1	53	44	3			4.883
		C4	46	26	18	10		5.362
		AI25		17	40	26	17	4.870
		A14	52	33	15			5.318
		AB26	100					5.287
	P3 (interna)	V20	40	53	7			5.609
		Q9						5.802
		Q13						4.863
		J10	75	25				3.458
		AI27	90	10				5.820
		Q10		18	48	25	9	5.658
		E3	12	64	24			5.308
		AO20				33	67	5.997
T2	P3 (externa)	S14						5.565
		J2			78	22		3.804
		P35		67	31	2		5.942
		AI26	35	32	23	10		5.855
		B9		54	42	4		5.682
		S27		39	27	28	5	5.943
	P1 (externa)	O7		54	34	13		13.691
		AE2			75	22		22.301
		Y25		2	48	43	7	13.263
		AE6	17	65	18			11.859
		AH12		59	32	10		15.913
		AF1		10	49	32	9	10.999
		AH9			60	38	1	13.989
	P1 (interna)	N13			14	81	5	10.729
		AD14		51	39	10		9.081

T2		Q5	62	35	3		9.352	
		X14		97	3		9.507	
		P28	31	58	12		11.090	
		S9	11	64	25		8.277	
		S10	56	34	10		9.865	
		P7		2	46	48	4	10.648
		P20			67	33		11.213
		AM24		21	72	7		11.741
	P1 (externa)	AE26			11	79	11	19.080
		K5				70	30	14.905
		P10				60	40	12.531
		N3			33	64	4	14.766
		AC7			26	74		14.444
		O8				7	93	14.016
	P2 (externa)	AM2		72	24	3		11.372
		AJ5	21	24	37	17		10.888
		R1						11.464
		N8		41	35	19	4	14.143
		K12				63	37	12.171
		AJ33		43	57			36.514
		AL28						15.029
	P2 (interna)	R8	79	21				8.641
		AN5	10	58	32			9.480
		S10	56	34	10			9.865
		AG17						10.308
		AB8	72	28				8.335
		AC13		21	30	33	15	8.932
		X11						10.199
		AF11	5	95				10.328
	P2 (externa)	N15		8	92			11.708
		P2		22	62	16		13.598
		Y9			76	24		17.552
		L11		3	47	30	20	13.812
		AG7			10	45	45	14.783
		AE18	31	45	24			16.878
		AM5		38	30	17	15	13.054
	P3 (externa)	P5			28	56	16	13.900
		Y8			11	89		18.625
		AJ31			29	50	21	13.922

T3	P3 (interna)	AM3			25	75	15.205		
		AE23			53	30	17	13.845	
		AJ4			10	87	3	14.518	
		T15			72	27	1	14.188	
		AN11			44	50	6	8.198	
		O13			83	17		8.160	
		O12			25	74	1	9.954	
		Y5			90	10		9.408	
		W4			40	39	22	9.308	
	P3 (externa)	AH8			35	32	33	9.987	
		Y25			2	48	43	7	13.263
		P2			22	62	16		13.598
		AJ13			7	65	27	13.769	
		O4				43	57	10.660	
		R13			19	54	27		11.552
		AE10			4	61	30	5	10.651
		AB3			30	70			13.937
		AJ28					55	45	13.467
	P1 (externa)	AF5				34	37	28	12.327
		C7				17	76	8	9.518
		E22			3	65	26	6	8.667
		H5			57	43			9.432
		D8			15	39	27	18	8.180
		D19			2	57	32	9	8.583
		F6			8	81	12		9.317
		E20			47	29	18	6	10.218
		P1 (interna)	E21			20	54	22	5
H2			33	65	2		7.842		
D18			8	54	26	12	7.360		
E18					31	63	6	7.636	
E16			1	58	31	10		7.822	
F7			62	37	1		7.399		
J11			62	38			7.049		
P1 (externa)	D9				79	21		8.751	
	E2				67	25	9	9.924	
	A2					76	24	9.261	
	E10				25	43	32	8.696	
	F5			70	30			8.708	
	E19			14	59	25	2	9.651	

T3	P2 (externa)	C17	68	19	13		10.757
		S16					8.122
		AJ11					11.013
		AI4		44	31	25	9.027
		V15					8.441
		V26		12		72 15	10.022
		V8			88	12	9.531
		Y28		10	65	25	9.908
	P2 (interna)	X17	74	26			7.725
		AC19		96	4		7.792
		X1			75	25	7.115
		AG5	933	7			8.062
		AF14	7	52	32	8	7.149
		AF7	4	51	32	13	7.835
		AA16	29	71			8.429
		P30	49	36	15		7.187
	P2 (externa)	R29	21	78	1		8.250
		O11		74	26		10.093
		AO3	5	67	22	6	10.416
		AB23	74	26			9.500
		AD1			7	86 6	9.645
		P16		34	57	10	11.027
		K4	58	42			8.729
	P3 (externa)	AB20	27	73			8.216
		AO15	30	46	23		10.032
		O16	10	85	5		9.408
		Y18			37	39 24	8.774
		N21		34	54	13	8.630
		AG11		76	24		10.403
		AC21	4	51	21	24	10.116
		AM7		16	43	28 13	8.352
T3	P3 (interna)	AN4	39	39	22		7.998
		Y7	11	89			8.550
		P8		35	40	25	8.525
		V2	8	69	23		7.203
		Y10	66	34			7.234
		N16		2	73	25	7.996
		V5	50	47	3		7.418
	P3	O19					10.070

T4	(externa)	P33			42	58		9.383
		AB18		38	62			10.732
		AD18	38	35	27			8.666
		AD11		22	67	11		10.645
		P3		18	63	19		10.886
		M4			41	37	22	8.356
		Q2	23	49	23	6		6.997
	P1 (externa)	Y2			55	30	15	7.245
		AI1	35	28	21	15		8.737
		AG23			28	44	29	8.735
		AN20	39	61				7.421
		Q20				32	68	7.002
		T10	21	40	31	8		7.808
		AF20		49	38	13		6.244
	P1 (interna)	AO9						6.537
		AO13						6.916
		AJ32		2	49	42	7	7.004
		Q3			6	52	42	6.861
		Q12		43	56	2		6.185
		Q11			46	27	27	6.360
		AG8	1	86	13			7.045
	P1 (externa)	AI33			49	51		7.000
		P36				78	22	7.003
		K7			30	34	36	7.416
		AI2				55	45	7.278
		S1		48	31	21		8.284
		AD15	1	65	34			8.156
	P2 (externa)	P13	13	53	34			7.944
		AM15	18	60	22			7.788
		Y30	11	78	10			8.761
		K11						7.558
		R22			15	85		8.845
		AL14		54	35	11		9.054
		X7						8.599
T4	P2 (interna)	AB26	100					6.287
		AD7	38	41	21			6.883
		AG20						6.014
		K6			27	25	48	6.322
		R19	82	18				6.397

T4	P2 (externa)	AG18		29	41	31		6.538
		P18	52	35	13			7.234
		S5	55	34	11			6.844
		T5		14	60	24	2	8.343
		AB5		90	10			7.881
		R28		34	66			7.635
		AH21			6	91	3	8.391
		AE27						9.051
		P1	63	37				8.528
		AI7	27	28	21	15	9	7.280
	P3 (externa)	E14	20	39	28	13		7.986
		B8			52	48		7.117
		H7	11	73	16			7.116
		B14			93	7		7.772
		A9		57	26	17		7.385
		A1	27	45	24	4		7.256
		A15		47	49	4		7.312
	P3 (interna)	H4	87	13				6.464
		A24		6	68	27		6.162
		C10		28	42	19	11	6.176
		C19	73	13	14			6.386
		A3	13	56	31			6.080
		D12	3	34	31	19	13	6.118
		A19	48	42	10			6.274
	P3 (externa)	E13	51	34	14			7.353
		D2	49	26	18	7		7.635
		A4		6	62	31	1	7.326
		F9		51	41	7		7.294
		F8	49	49	2			7.162
		D3		10	52	29	9	7.094
		E6	30	44	22	4		7.820