UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ÂNGELA MARIA STÜPP

ELEMENTOS FINITOS COMO MÉTODO DE ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM EMENDAS DE MADEIRA *FINGER JOINT*

> CURITIBA 2022

ÂNGELA MARIA STÜPP

ELEMENTOS FINITOS COMO MÉTODO DE ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM EMENDAS DE MADEIRA *FINGER JOINT*

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 Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos

Coorientador: Prof. Dr. Marco André Argenta

Coorientador: Prof. Dr. Alexsandro Bayestorff da Cunha

CURITIBA 2022

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

Stüpp, Ângela Maria Elementos finitos como método de análise da concentração e distribuição de tensões em emendas de madeira *finger joint /* Ângela Maria Stüpp. – Curitiba, 2022. 1 recurso on-line : PDF Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos Coorientadores: Prof. Dr. Marco André Argenta Prof. Dr. Alexsandro Bayestorff da Cunha Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 13/05/2022. Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais. 1. Madeira – Propriedades mecânicas. 2. Eucalyptus grandis. 3. Colagem. 4. Análise numérica. 5. Teses. I. Matos, Jorge Luis Monteiro de. II. Argenta, Marco André. III. Cunha, Alexsandro Bayestorff da. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título. CDD - 634.9 CDU - 634.0.812.7

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 ÂNGELA MARIA STÜPP intitulada: Elementos Finitos Como Método de Análise da Concentração e Distribuição de Tensões em Emendas de Madeira Finger Joint, sob orientação do Prof. Dr. JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS, 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, 13 de Maio de 2022.

Assinatura Eletrônica 16/05/2022 09:01:14.0 JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica 16/05/2022 10:10:06.0 ROSILANI TRIANOSKI Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

19/05/2022 11:26:21.0 RODRIGO FIGUEIREDO TEREZO Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

Assinatura Eletrônica 17/05/2022 14:47:10.0 RAFAEL LEITE BRAZ Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO) Assinatura Eletrônica 16/05/2022 08:38:13.0 IVAN VENSON Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Avenida Lothário Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil CEP 80210-170 - Tel: (41) 3360-4212 - E-mail: pgfloresta@gmail.com Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015. Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 186151 Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://www.prpgg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp e insira o codigo 186151

Dedico

Aos meus pais, João e Maria Aos meus irmãos, Vandréia, Aloíso e César Ao meu namorado, Adam

Amo-os muitíssimo

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da vida e da saúde, pelo despertar de cada dia.

Aos meus pais João e Maria, meus mais ilustres mestres, os primeiros a incentivar e ser exemplo, agradeço por serem o meu porto seguro, sempre tão firme.

Aos meus irmãos Vandréia, Aloísio e César, pelo apoio que me deram durante toda a vida, pelas palavras encorajadoras e, por vezes, me ajudarem a encontrar uma solução. Agradeço por sempre "estarem lá".

Ao Adam, meu farol nesse mar turbulento, por ser luz.

Ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Luis Monteiro de Matos, agradeço os ensinamentos e solicitude que dedicou desde antes do meu ingresso no Doutorado, as oportunidades e experiências em Laboratório e a campo.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Marco André Argenta, agradeço por aceitar este desafio, pela disposição e os estímulos por conhecimento.

Ao Professor Doutor Alexsandro Bayestorff da Cunha, também coorientador, agradeço a ajuda e gentileza, mesmo distante.

Ao Professor Doutor José Guilherme Prata, agradeço as contribuições e aconselhamentos, e por estar sempre disposto a colaborar.

À técnica de laboratório, Mariuci Torres dos Santos, pela convivência, amizade e apoio nos ensaios e demais atividades.

À Cometa Madeiras, na pessoa do Everson Menegotto, pelo material fornecido, por disponibilizar a estrutura da empresa para a produção das amostras, e pelo interesse em aperfeiçoar o processo produtivo de Madeira Laminada Colada.

Aos colegas de Pós-Graduação, especialmente à Helena, Vinícius, Rafael, Joielan e Tawani, pelos momentos de descontração dentro e fora da Universidade, bem como pelas colaborações nos projetos e trabalhos acadêmicos.

Aos técnicos dos demais laboratórios, agradeço a cordialidade e auxílio no uso dos equipamentos.

À Universidade Federal do Paraná pela oportunidade e estrutura, e aos Mestres que nela exercem seu ofício com competência.

Ao Programa UNIEDU Pós-Graduação da Secretaria de Educação do Estado de Santa Catarina, pelo aporte financeiro.

Muito obrigada!

I'd made it this far and refused to give up because all my life I had always finished the race.

Louis Zamperini

RESUMO

Dentre os diversos aspectos envolvendo as emendas finger joint, a pressão de colagem se destaca por estar relacionada aos demais fatores e, também, por provocar tensões ao longo dos entalhes. A partir disto, o objetivo desta pesquisa foi simular a distribuição de tensões ao longo de emendas finger joint causada pela pressão de colagem, bem como avaliar o desempenho tecnológico destas emendas e da madeira sólida de Eucalyptus grandis. Inicialmente, foram verificadas as propriedades: densidade básica (ASTM D 2395-17), anisotropia de contração e inchamento (ASTM D 143-00) e resistências à compressão e tração paralelas às fibras da madeira maciça (ASTM D 4761-19). Também, foi avaliada a resistência à tração paralela às fibras das peças com emendas finger joint (ASTM D 4688-14). Para o cálculo do Módulo de Elasticidade (E) foi utilizada a ferramenta DIC (Digital Image Correlation), com a qual se obtém o deslocamento de cada amostra durante o ensaio mecânico e, então, calcula-se a deformação. Finalmente, o Método dos Elementos finitos foi empregado de forma a simular a pressão de colagem para verificação da distribuição das tensões ao longo dos entalhes. Como resultado, a densidade básica encontrada foi de 0,497 g/cm³. O desempenho médio das amostras nos testes de compressão paralela foi de 53,06 MPa, semelhante ao normalmente encontrado na literatura. O valor característico calculado foi de 46,84 MPa. Diferentemente, a resistência à tração paralela às fibras apresentou ótimo comportamento (118,50 MPa) em relação ao que normalmente é obtido para esta espécie. Os resultados das solicitações mecânicas indicaram que a madeira utilizada pode ser empregada para fins estruturais considerando-a na classe C40 (NBR 7190-97). A simulação com o Método dos Elementos Finitos demonstrou como ocorre a distribuição de tensões ao longo dos entalhes durante a pressão de colagem, apontando pontos mais concentrados na base e seus entornos. A ferramenta foi capaz de simular adequadamente o modelo definido, evidenciando as muitas possibilidades que a ferramenta oferece, sendo adequada para analisar diferentes produtos e materiais.

Palavras-chave: *Eucalyptus grandis*; Análise numérica; resistência mecânica, emendas por entalhes múltiplos, *Digital Image Correlation*.

ABSTRACT

Among the various aspects involving finger joints, end pressure stands out for being related to other factors and also for causing tensions along the notches. Therefore, the aim of this research was to simulate the stress distribution of finger joints caused by end pressure. In addition, to evaluate the physical and mechanical performance of the joints and Eucalyptus grandis wood. Initially, the following properties were analyzed: basic density (ASTM D 2395-17), shrinkage (ASTM D 143-00), tension and compression parallel to the grain of the solid timber (ASTM D 4761-19), and tension parallel to the grain of finger joints (ASTM D 4688-14). DIC (Digital Image Correlation) was employed to calculate the Modulus of Elasticity (E), with which the displacement was obtained during the tests and used to strain calculation. Finally, Finite Element Method was applied to simulate end pressure in order to verify the stress distribution in finger joints. As a result, basic density was 0.497 g/cm³. For the compression parallel to the grain tests, the average performance of the specimen was 53.06 MPa, similar to those regularly found in the literature. The characteristic value was 46,84 MPa. Atypically, tensile strength parallel to the fibers showed an optimal behavior (118.50 MPa) compared to results normally reached for this specie. The mechanical tension results indicated that this wood can be employed for structural purposes, considering it in C40 class (NBR 7190-97). The finite element method simulation demonstrated how stresses are distributed in the finger joints during end pressure, identifying major concentrated points in the base and its surroundings. FEM tool was able to adequately simulate the model, highlighting the many possibilities that the tool offers, being suitable for analyzing different contexts, products and materials.

Keywords: *Eucalyptus grandis*; numerical analysis; mechanical strength; finger joints; Digital Image Correlation .

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - AQUISIÇÃO DE IMAGENS EM (A) 2D E (B) 3D
FIGURA 2 - (1) PADRONIZAÇÃO DA REGIÃO PARA RASTREAMENTO; (2)
CAPTURA DE IMAGENS EM DESLOCAMENTO; (3) ANÁLISE NO
SOFTWARE GOM CORRELATE®
FIGURA 3 - VARIAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS
FIGURA 4 - EDIFICAÇÃO EM MLC, FRANÇA31
FIGURA 5 - EDIFICAÇÃO EM MLC, FRANÇA32
FIGURA 6 - EMENDA FINGER JOINT HORIZONTAL EM MADEIRA DE E. grandis. 33
FIGURA 7 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA GEOMETRIA DE EMENDAS FINGER
JOINT
FIGURA 8 - GEOMETRIA DESIGUAL EM EMENDA FINGER JOINT
FIGURA 9 - CORPOS DE PROVA EM CÂMARA CLIMATIZADA45
FIGURA 10 - PREPARAÇÃO DA AMOSTRA NO EQUIPAMENTO STRESS WAVE
TIMER
FIGURA 11 - PROCESSO DE REDUÇÃO DE SEÇÃO DAS AMOSTRAS50
FIGURA 12 - DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO DE
COMPRESSÃO PARALELA DA MADEIRA DE Eucalyptus grandis51
FIGURA 13 - FINGER JOINT RECÉM FRESADO
FIGURA 14 - APLICADOR DO ADESIVO NAS EMENDAS FINGER JOINTS52
FIGURA 15 - PRENSAGEM DE DUAS PEÇAS COM ENTALHES FINGER JOINT53
FIGURA 16 - AMOSTRAS DE TRAÇÃO PARALELA COM REDUÇÃO DE SEÇÃO: (1)
REDUÇÃO DA ESPESSURA – AMOSTRAS FINGER JOINT; (2) REDUÇÃO
DA ESPESSURA E LARGURA – AMOSTRAS MACIÇAS
FIGURA 17 - AMOSTRAS DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS PULVERIZADA COM
TINTA PRETA56
FIGURA 18 - VALORES DE DESLOCAMENTO LONGITUDINAL (Y) EM AMOSTRA
DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS
FIGURA 19 - MALHA GERADA COM ELEMENTOS TRIANGULARES CPS6M. AS
ARESTAS NO COMPRIMENTO DOS ENTALHES FORAM DESTACADAS
PARA MELHOR COMPREENSÃO DAS PEÇAS MONTADAS59
FIGURA 20 - CONDIÇÕES DE CONTORNO APLICADAS: ENGASTE E VELOCIDADE.

FIGURA 21 - DIREÇÃO DESIGUAL DOS PLANOS ORTOGONAIS. AMOSTRAS DE	
PROPRIEDADES FÍSICAS.	62
FIGURA 22 - TENSÕES GERADAS PELA PRESSÃO DE COLAGEM NO SENTIDO	
PARALELO (S22).	70
FIGURA 23 - TENSÕES GERADAS PELA PRESSÃO DE COLAGEM NO SENTIDO	
PERPENDICULAR (S11).	70
FIGURA 24 - EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NAS PONTAS E BASE	
DOS ENTALHES AO LONGO DA APLICAÇÃO DE PRESSÃO	71
FIGURA 25 - EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NAS PONTAS E BASE	
DOS ENTALHES AO LONGO DA APLICAÇÃO DE PRESSÃO	.72

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA MADEIRA27
GRÁFICO 2 - PRESSÃO DE COLAGEM EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DOS
ENTALHES
GRÁFICO 3 - GRÁFICO TENSÃO X DENSIDADE DAS AMOSTRAS DE
COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS64
GRÁFICO 4 - GRÁFICO DE TENSÃO X DENSIDADE DAS AMOSTRAS MACIÇAS DE
TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS65
GRÁFICO 5 - GRÁFICO DE TENSÃO X DENSIDADE DAS AMOSTRAS FINGER
JOINT DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS67
GRÁFICO 6 - GRÁFICO TENSÃO X MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS AMOSTRAS
FINGER JOINT

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PRESSÃO DE COLAGEM DE EMENDAS FINGER JOINT
TABELA 2 - NORMAS UTILIZADAS E NÚMERO DE CORPOS DE PROVA POR
ENSAIO45
TABELA 3 - MODOS DE RUPTURA DE AMOSTRAS FINGER JOINT PARA O ENSAIO
DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS (ASTM D 4688-2014)54
TABELA 4. VALORES DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS INSERIDOS NO
ABAQUS®
TABELA 5 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO MATERIAL61
TABELA 6 - RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS AVALIADAS DA
MADEIRA DE Eucalyptus grandis COM E SEM EMENDAS FINGER JOINT.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	.15
1.1.	OBJETIVOS	. 16
1.1.1.	Objetivo geral	. 16
1.1.2.	Objetivos específicos	. 17
2	REVISÃO DE LITERATURA	.18
2.1.	GÊNERO Eucalyptus	. 18
2.2.	Eucalyptus grandis	. 20
2.3.	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA	. 21
2.3.1.	Densidade	. 22
2.3.2.	Umidade	. 23
2.3.3.	Retratibilidade e inchamento	. 23
2.3.4.	Resistência a solicitações mecânicas	. 24
2.4.	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E MÓDULO DE ELASTICIDADE	. 26
2.5.	DIC – Digital Image Correlation	. 28
2.6.	PRODUTOS DE MADEIRA – Madeira Laminada Colada	. 31
2.6.1.	Finger joints	. 33
2.6.1.1.	Fatores que interferem no processo	. 35
2.6.1.2.	Densidade e teor de umidade	. 35
2.6.1.3.	Adesivo	. 37
2.6.1.4.	Geometria	. 37
2.6.1.5.	Processo de usinagem	. 38
2.6.1.6.	Pressão de colagem	. 38
2.6.1.7.	Concentração de tensões	. 40
2.6.1.8.	Distribuição de tensões	. 41
2.7.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	. 42
3	MATERIAL E MÉTODOS	.44

REFER	ÊNCIAS	74
5	CONCLUSÕES	73
4.3.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	69
4.2.1.	Grau de enfraquecimento e perda de resistência	68
4.2.	PROPRIEDADES MECÂNICAS	62
4.1.	PROPRIEDADES FÍSICAS	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.2.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	58
3.1.3.	Deslocamento e deformação das amostras	55
3.1.2.	Produção de emendas <i>finger joint</i>	51
3.1.1.1.	Determinação das propriedades físicas e mecânicas	45
3.1.1.	Preparo dos corpos de prova maciços	44
3.1.	MATÉRIA-PRIMA	44

1 INTRODUÇÃO

Esforços têm sido feitos em vista de difundir as potencialidades dos produtos feitos de madeira, sobretudo os engenheirados, sendo a Madeira Laminada Colada (MLC), um dos mais empregados nas edificações. Pesquisas no âmbito das estruturas têm buscado o aperfeiçoamento de técnicas e processos que contribuam com a sua melhoria, conferindo maior segurança no emprego dos produtos, bem como a otimização no processo produtivo, tais como em Bustos *et al.* (2003), Figueroa e Moraes (2009), e Frank *et al.* (2014), Scapinello (2021).

A madeira laminada colada é produzida a partir da colagem longitudinal de lamelas sobrepostas entre si. Para a fabricação de elementos alongados são utilizadas emendas de topo, sendo as emendas por entalhes múltiplos (*finger joint*) as mais empregadas e, se bem feitas, garantem boa resistência.

Durante o processo de fabricação, diversos fatores relativos a estes entalhes devem ser controlados. A combinação de variáveis como densidade da madeira, geometria dos entalhes múltiplos da emenda, pressão aplicada na prensagem e gramatura do adesivo empregado é decisiva para que a emenda seja eficiente e durável. Destes aspectos, a pressão aplicada é o fator mais crítico. Isso se deve, nos casos em que a pressão de colagem é inferior à ideal, à fraca pressão lateral e à folga deixada entre a ponta do entalhe e a base. Quando muito alta, além de provocar a abertura de fendas na base do entalhe e o esmagamento na ponta, há também a geração de tensões ao longo de todo o *finger joint*. Essas tensões são originadas independentemente do valor de pressão adotado, visto que a pressão ótima é a que, quase imediatamente à prensagem, possibilita a pressão lateral por efeito de os entalhes serem ligeiramente mais largos que a abertura onde eles são encaixados, não a pressão de topo propriamente dita.

As tensões geradas pela combinação das variáveis durante o processo de prensagem, bem como sua distribuição, podem ser avaliadas, e a análise pode ser implementada com o método dos elementos finitos. A aplicação desses métodos de análise viabiliza a observação de como as tensões ocorrem e se distribuem por toda a extensão do *finger joint*. Isso, porque o método permite discretizar uma peça ou estrutura complexas em elementos menores, finitos, e que produzem efeitos sobre os elementos circunvizinhos. Adotando as características do material e as condições de contorno, simula-se todo o comportamento do componente.

Pesquisas envolvendo a análise numérica e o método dos elementos finitos (MEF) para análise de emendas por entalhes múltiplos ainda são incipientes no Brasil, tornando, estas, um campo promissor para o desenvolvimento de projetos, que podem ser aprimorados para aplicações diversas, inclusive de cunho comercial. Sabendo-se que as tensões produzidas pela pressão de colagem interferem na resistência, o processo de produção das emendas pode ser otimizado para diminuir a ocorrência de tensões, sendo, o MEF, uma ferramenta adequada para analisar a distribuição de tensões em emendas *finger joint*. Diversos pesquisadores aplicaram MEF com sucesso para monitorar o comportamento mecânico de emendas *finger joint*, como em Milner e Yeoh (1991), Jauslin *et al.* (1995), Smardzewski (1996), Hernandez (1998), Konnerth *et al.* (2006), Franke *et al.* (2014), Tran *et al.* (2014), He *et al.* (2020), e Timbolmas *et al.* (2022).

A extensa diversidade de aplicações da madeira possibilita a utilização de diferentes qualidades dessa matéria prima para os distintos fins aos quais será empregada. Ainda assim, o manejo das florestas e a condução dos povoamentos, geralmente, são voltados para a demanda determinada pela indústria e, no atual cenário econômico, este manejo não contempla em sua maioria o uso estrutural, especificamente a construção civil. Isto evidencia a inevitabilidade de optar por madeiras oriundas de povoamentos distantes, por vezes em países vizinhos, agregando maiores custos ao produto final. Também, culturalmente o Brasil não possui um mercado abrangente de utilização de madeira para a construção civil, o que desestimula a condução e o incentivo ao aperfeiçoamento de tecnologias para este uso, diferente de outros países onde estas soluções são amplamente empregadas.

Em contrapartida, o desenvolvimento de tecnologias construtivas, tais como wood frame, MLC e CLT, e modos de produção com madeira engenheirada, como a construção modular, tem demonstrado os esforços feitos pelo setor para encontrar soluções que desmistifiquem os preconceitos e transformem a imagem que a população possui em relação ao uso da madeira para construção civil. Frente ao exposto, pretende-se contribuir com o setor quanto à utilização de madeira e produtos de madeira engenheirada para fins estruturais, potencializando a sua aplicabilidade, bem como apresentar a madeira como alternativa viável aos dogmas da engenharia de edificações.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Analisar pelo Método dos Elementos Finitos a distribuição de tensões originadas pela interação das variáveis inerentes ao processo de produção de emendas por entalhes múltiplos do tipo *finger joints* em madeiras de *Eucalyptus grandis*.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar propriedades tecnológicas de *Eucalyptus grandis* proveniente do Uruguai utilizada neste projeto..
- Avaliar a resistência à tração paralela às fibras de amostras com emendas de entalhes múltiplos (*finger joints*) de *Eucalyptus grandis* com finalidade de utilização estrutural.
- Determinar a perda de resistência e os modos de ruptura de cada amostra com emendas *finger joint*.
- Analisar a distribuição de tensões nas emendas *finger joint* produzidas durante o processo de prensagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. GÊNERO Eucalyptus

O gênero *Eucalyptus* e suas aplicações têm sido estudadas desde o final dos anos 1800 em todo o mundo (BENTLEY, 1874; COOPER, 1876; MUELLER, 1879; WARREN, 1882; WARREN, 1887; MAIDEN, 1889), inclusive na área médica (TODD, 1874; PLANCHON, 1875).

Ao longo do século seguinte diversas espécies do gênero foram pesquisadas (KRUG & ALVES, 1949; BAMBER *et al.*, 1969; BRASIL & FERREIRA, 1972; HANS *et al.*, 1972; NELSON & HEATHER, 1972) e melhoradas combinando, no mesmo genótipo, características naturalmente dispersas. Isso permitiu a obtenção de variedades com características mais desejáveis como resistência a determinado sítio e/ou condições climáticas, maior incremento volumétrico (MALAN, 1988), ou ainda, melhoradas com um objetivo específico (BORRALHO & COTTERILL, 1994).

Próximo aos anos 2000, múltiplas espécies melhoradas já haviam sido alcançadas (RESENDE & HIGA, 1990) e tecnologias genéticas aperfeiçoadas. Por consequência, relatórios e artigos científicos foram publicados para elucidar questões decorrentes dos resultados obtidos (MARTIN, 2003). Similarmente, diversos estudos foram desenvolvidos a fim de determinar a qualidade e o uso mais adequado do material obtido, impactando positivamente todo o setor (ASSIS, 2000; MALAN, 1993; MALAN, 1995, PALLETT & SALE, 2004; SCHIMLECK *et al.*, 2004; TIBITS *et al.*, 1995), além de analisar os impactos causados e tolerados pela cultura (BARREIRO & TOMÉ, 2011; BOOTH, 2013; BROCKERHOFF *et al.*, 2013; ARAUJO *et al.*, 2020; LUCAS & HARRIS, 2021; SINGH *ET al.*, 2021).

As pesquisas com o *Eucalyptus* continuam sendo implementadas (BÁDER & NÉMETH, 2018; AMER *et al.*, 2021; IEJAVS *et al.*, 2021; TOMÉ *et al.*, 2021), evidenciando a relevância do gênero e da matéria-prima, assim como sua complexidade, que possibilita o emprego em múltiplos setores e para variados fins.

Uma das espécies com maior destaque e que tem sido mais cultivada é o *E. grandis*. Miranda (2012) considera que a espécie pode ser usada de inúmeras formas e, aliado a isso, apresenta rápido crescimento, características silviculturais desejáveis, importância econômica e expressiva variabilidade genética. As condições climáticas, o crescimento e a região de crescimento das árvores, exercem grande influência no rendimento da floresta e na qualidade da madeira. Consequentemente, as propriedades físicas e mecânicas das espécies de árvores de rápido crescimento variam significativamente (ÁLVAREZ *et al.*, 2013; ELZAKI & KHIDER, 2013; MEDERSKI *et al.*, 2015).

Com mais de 700 espécies catalogadas, distribuídas em uma ampla gama de ambientes que vão desde florestas tropicais, subtropicais e temperadas (BYRNE, 2008), o gênero *Eucalyptus* tem seu uso amplamente diversificado, sendo empregado como matéria-prima em indústrias de papel e celulose, painéis de madeira, serrarias e laminadoras, carvão vegetal, entre outros fins. Apesar de toda essa multiplicidade, apenas cerca de 20 espécies são utilizadas comercialmente no mundo. Para Júnior e Colodette (2013), o Brasil é líder em silvicultura e melhoramento do gênero, com plantios em todo o território nacional.

A notável adaptabilidade dos eucaliptos, juntamente com seu rápido crescimento e distintas propriedades da madeira, impulsionou sua rápida adoção para plantações florestais comerciais em mais de 100 países em seis continentes (> 20 milhões de ha) (IGLESIAS e WILTERMANN, 2009 citado por MYBURG *et al.*, 2014), tornando o gênero o grupo de angiospermas mais amplamente plantado no mundo.

Apresentando-se como uma alternativa para o abastecimento da indústria madeireira, o *Eucalyptus* possui limitações próprias e inerentes às madeiras oriundas de florestas de rápido crescimento (GONÇALEZ *et al.*, 2006). Os problemas iniciais mais graves com a madeira de eucalipto eram as rachaduras e as deformações. A presença de certas características desfavoráveis, como a elevada retratibilidade, a propensão ao colapso e a presença de altos níveis de tensão de crescimento explica, em parte, esses principais defeitos. As tensões são esforços mecânicos gerados durante o crescimento da árvore que ajudam a manter o equilíbrio da copa, em resposta à ação de agentes ambientais. Quando as árvores são derrubadas e suas toras são desdobradas, essas tensões são liberadas, provocando a formação de rachaduras de topo nas toras, empenamentos e rachaduras nas tábuas, reduzindo, significativamente, o rendimento de madeira serrada (DEL MENEZZI, 1999).

Em contrapartida, produtos têm sido estudados e desenvolvidos visando o melhor aproveitamento da matéria-prima disponível a partir do entendimento do seu comportamento. A compreensão de suas características permite, ainda, a adoção de estratégias e ferramentas para o desenvolvimento de novos produtos baseado em características de baixo desempenho dependendo do produto a ser produzido. Alguns exemplos estão em produtos como: MDP – *Medium Density Particleboard* (DA ROSA *et al.*, 2017; NIEKERK E PIZZI, 1994; CABRAL

et al., 2007), MDF - Medium Density fiberboard (FREISCHMIDT E BRAKEMORE, 2009; XIAO et al., 2014), OSB – Oriented Strand Board (GOUVEIA, SANTANA e SOUZA, 2000; IWAKIRI et al., 2008), LVL – Laminated Veneer Lumber (BAL, 2016; SAVIANA, ZITTO e PITER, 2009), OSL – Oriented Strand Lumber (CHEN et al., 2019), MLC (AICHER, CHRISTIAN e DILL-LANGER, 2014; CASTRO e PAGANINI, 1999; 2003; LARA-BOCANEGRA et al., 2020), e CLT – Cross Laminated Timber (LU et al., 2018; DUGMORE et al., 2019).

O setor da construção civil em madeira encontra-se concentrado em áreas como construções provisórias, coberturas e produtos com maior valor agregado, como portas, janelas e pisos, não sendo representativa a área das construções. Dadas as características da população e do país, são poucas as empresas que se firmaram como especialistas na área da construção em madeira, onde poucos fornecedores são suficientes para atender à demanda (VALLE, 2011).

2.2. Eucalyptus grandis

O *E. grandis* subtropical e o *E. globulus* temperado se destacam como alvos de programas de melhoramento em todo o mundo. Os eucaliptos plantados fornecem recursos renováveis essenciais para a produção de celulose, papel, biomateriais e bioenergia, ao mesmo tempo que mitigam as pressões humanas sobre as florestas nativas (BAUHUS *et al.*, 2010).

A madeira do *Eucalyptus grandis* é leve, relativamente dura e facilmente trabalhável. Possui fibra reta, trinca facilmente e apresenta cor levemente avermelhada, sendo o cerne de cor mais escura que o alburno, o qual apresenta suscetibilidade ao Lyctus (CHRISTOFORO *et al.*, 2015), besouro que degrada a madeira para ovipositar e se alimentar do amido e açúcares presentes no lenho.

Devido a algumas características indesejáveis, intrínsecas da madeira, diversas pesquisas são desenvolvidas há muitos anos visando minimizar estes aspectos, visto que interferem no rendimento e empregabilidade da madeira. Uma das pesquisas em questão, obtida por meio de melhoramento genético, resultou na espécie comercializada pela Compañia Forestal Uruguaya S.A (COFUSA), tendo recebido o nome de *Eucalyptus redgrandis*®. O referido clone foi desenvolvido a partir de 1989 no Uruguai em parceria com uma Universidade norte-americana, e obtida a partir de melhoramento genético por clonagem para uso como madeira serrada.

2.3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

Não há propriedade da madeira - física, mecânica, química, biológica ou tecnológica - que não seja fundamentalmente derivada do fato de que a madeira é formada para atender às necessidades da árvore viva (GLASS e ZELINKA, 2021). Ao compreender a função da madeira na árvore viva, pode-se entender melhor os pontos fortes e as limitações que ela apresenta como material (WIEDENHOEFT, 2010).

A madeira, seja analisada nos cortes radial, transversal ou longitudinal, ao longo do fuste, possui diferentes tipos de células adaptadas ao desempenho de funções específicas, sendo que as variações nas suas composições químicas, físicas e anatômicas são grandes entre as espécies. Dentro da mesma espécie, elas também ocorrem conforme a idade, posição na árvore, fatores genéticos e ambientais, sendo, portanto, considerada um material heterogêneo (SHIMOYAMA, 1990; DINWOODIE, 1975; MEGRAW, 1985; SAVIDGE, 2003).

Entre as características mais importantes das árvores quanto à qualidade da madeira, as propriedades físicas e mecânicas se destacam. A qualidade se refere à combinação das características físicas, mecânicas, químicas e anatômicas da árvore, as quais permitem a melhor utilização da madeira para um determinado uso (GONÇALEZ *et al.*, 2006). Devido à característica ortotrópica da madeira, essas propriedades são diferentes entre espécies, sítios, indivíduos, bem como nos sentidos base-topo e medula-casca. Por todas as suas particularidades, a consideração da anisotropia e da ortotropicidade da madeira em suas diversas aplicações, principalmente quanto à sua estabilidade dimensional, é determinante para o bom desempenho da estrutura da edificação.

A madeira tem sido usada como um material de construção por centenas de séculos e em muitas de suas propriedades de resistência ela se compara favoravelmente com outros materiais de construção, especialmente quando as comparações são feitas com base no pesoresistência (DINWOODIE, 1975). É um material oriundo de plantações de rápido crescimento e geralmente têm propriedades físicas e mecânicas que a tornam menos desejável do que a madeira de povoamentos mais antigos, uma vez que as árvores de alto desenvolvimento contêm mais madeira juvenil. O tamanho do cerne juvenil está relacionado à taxa de crescimento, que é influenciada pelo espaçamento inicial e pelo período até o fechamento da copa (CLARK & SAUCIER, 1991).

2.3.1. Densidade

A densidade da madeira é um importante indicador de sua qualidade em muitas áreas da indústria florestal. Impacta a produtividade, a qualidade da celulose e a possibilidade de fazer as manipulações genéticas e agrícolas desejadas (KRZYSIK, 1978). A densidade da madeira é considerada uma característica chave na determinação da qualidade por possuir uma forte correlação com as outras propriedades (PANSHIN e DE ZEEUW, 1980).

Essa propriedade física se refere à quantidade de parede celular por espaços vazios da peça, apresentando alterações ao decorrer do tronco, o que interfere diretamente na qualidade do material (RODRIGUES *et al.*, 2018). Isso pode ser explicado pela sua relação com inúmeras características intrínsecas que constituem a mesma, como a porosidade, heterogeneidade e higroscopicidade (SANGUMBE *et al.*, 2019).

As variações na densidade da madeira ao longo do tronco são menos consistentes do que aquelas na direção radial. À medida que o cilindro de madeira juvenil se estende da base ao topo, a proporção de madeira juvenil sobre a seção transversal do caule aumenta (TAYLOR, 2010).

É, normalmente, o ponto de partida no estudo da qualidade da madeira, podendo prever ou estimar seu comportamento, auxiliar na otimização da produção da madeira, dos tratos silviculturais e na elaboração e condução dos planos de corte, e ainda, ser um subsídio para avaliação econômica da floresta. As indústrias de base florestal também a consideram como uma das mais importantes, já que é de fácil determinação e está correlacionada com rendimentos e características de diversos produtos (BONDUELLE *et al.*, 2015).

Madeiras de menor densidade possuem menor resistência mecânica em comparação com as madeiras de alta densidade, evidenciando a forte relação entre a densidade da madeira e as suas propriedades mecânicas (BLANKENHORN, 2001; LOBÃO *et al.*, 2004).

No caso de produtos colados, Frihart e Hunt (2010) ponderaram que a densidade seja, talvez, um indicador bruto, mas que é útil para estimar a capacidade de colagem de uma grande variedade de espécies de madeira. Os autores afirmaram, ainda, que a densidade e a anatomia da madeira controlam a porosidade da madeira, o que geralmente afeta a penetração e o desempenho da ligação. Para atingir a maior resistência da junta, o adesivo deve penetrar e interligar várias células profundamente na estrutura celular. Na madeira, a porosidade varia de acordo com a direção da fibra, sendo superfícies transversais muitas vezes mais porosas que as radiais ou tangenciais. Os adesivos penetram muito facilmente nos lúmens abertos, o que pode

causar superpenetração, principal razão pela qual é tão difícil formar ligações fortes nas juntas de topo.

Ainda, segundo Markwardt e Wilson (1935), a resistência mecânica aumenta proporcionalmente com o aumento da densidade, e para uma mesma densidade, o aumento da umidade provoca uma redução na resistência do material.

2.3.2. Umidade

A madeira no estado verde, ou seja, recém-cortada, tem teores de umidade que variam de 60% a 200%, com base no peso da madeira seca em estufa. A madeira pode ser usada com estes teores de umidade apenas em situações em que permanece imersa em água, estacas por exemplo. Para todos os outros usos o teor de umidade deve ser reduzido para fornecer estabilidade dimensional e reduzir o risco de ataque de fungos. A redução no teor de umidade pode ser efetuada por secagem ao ar livre, sendo necessário bastante tempo até que a madeira atinja a umidade de equilíbrio, ou por secagem em estufas, onde a ação combinada de calor e umidade é usada para secar a madeira a uma taxa controlada, reduzindo, assim, os efeitos indesejáveis, como rachaduras e torções (DINWOODIE, 1975).

A água na madeira tem um forte efeito nas propriedades da madeira, e as relações madeira-água afetam muito o uso industrial da madeira em seus produtos (GLASS e ZELINKA, 2021). A influência do meio ambiente no desempenho da madeira ou de materiais à base de madeira é significativa em muitas aplicações. As propriedades mecânicas dos materiais de madeira dependem do teor de umidade e mudanças dimensionais induzidas pela variação de umidade muitas vezes levam a deslocamentos que são substancialmente maiores do que aqueles causados por carregamento mecânico (MÄRTENSSON e THELANDERSSON, 1990).

2.3.3. Retratibilidade e inchamento

Todo material higroscópico, como a madeira e vários outros materiais celulósicos, apresenta contração quando o seu teor de umidade do ponto de saturação das fibras (PSF) é reduzido até à condição absolutamente seca ou anidra. A contração e a expansão higroscópica da madeira são dois dos mais importantes problemas práticos que ocorrem durante a sua utilização, como consequência da mudança do teor de umidade. A magnitude das variações dimensionais depende de inúmeros fatores, como o teor de umidade, a direção estrutural (radial, tangencial ou longitudinal), a posição dentro da árvore, a densidade da madeira, a temperatura,

o grau de estresse de secagem causada pelo gradiente de umidade, entre outros (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

À medida que absorve ou dessorve umidade abaixo do ponto de saturação da fibra, as dimensões da madeira são alteradas. A madeira contrai ao dessorver a umidade e incha ao absorver a umidade. O encolhimento pode resultar em rachaduras, empenamento e outros danos à madeira (HARADA *et al.*, 2005). Devido à característica anisotrópica, as mudanças dimensionais observadas na madeira são diferentes ao longo das três direções estruturais. Em geral, a contração na direção tangencial é, aproximadamente, duas vezes maior do que na direção radial. A razão entre a contração tangencial e radial (relação T/R), comumente chamada de fator de anisotropia, geralmente varia de 1,5 a 2,5, e tornou-se um índice muito importante nos estudos de contração de madeira; quanto maior essa relação, maior será a tendência ao fendilhamento e empenamento da madeira. Para usos que envolverem estabilidade dimensional da madeira, a mais recomendada é aquela que apresentar a menor taxa T/R (OLIVEIRA e SILVA, 2003), sendo que, mais próximo de 1, maior a estabilidade.

Uma única alteração no teor de umidade provoca uma mudança na deformação que não depende significativamente do instante em que a variação de umidade atua, sendo a tensão axial e a deformação na mesma direção (RANTA-MAUNUS, 1975). A madeira de rápido crescimento proveniente de árvores do gênero *Eucalyptus* apresenta uma contração excessiva e ocasiona defeitos de secagem como empenamentos e fendilhamentos, os quais tendem a ser piores em madeiras de menor densidade (HILLIS e BROWN, 1978).

2.3.4. Resistência a solicitações mecânicas

Muitos fatores e condições afetam a resistência da madeira. Segundo Tiemann (1906), ela não apenas de estar livre de imperfeições como nós e deterioração, mas também de sua densidade, da taxa de crescimento e do arranjo dos vários elementos a que deve sua resistência, não apenas ao material de que é feito, mas também à forma e arranjo de sua estrutura.

A madeira é um dos poucos materiais que possui alta dureza, bem como alta rigidez, e essa combinação única de propriedades é responsável por muitas das aplicações. A resistência à flexão é aproximadamente metade da resistência à tração ao longo da fibra, enquanto a resistência à compressão longitudinal é cerca de um quarto da resistência à tração correspondente (DINWOODIE, 1975). A resistência e a rigidez da madeira são consideravelmente maiores nas direções longitudinais do que nas perpendiculares. Isso pode ser facilmente compreendido com base em 90-95% das fibras sendo orientadas longitudinalmente. Há também uma diferença nas propriedades entre as direções radial e tangencial devido à presença dos raios, bem como à diferença na estrutura celular entre as direções radial e tangencial e as diferenças de orientação das microfibrilas nos vários lados da célula (HOLMBERG *et al.*, 1999).

A aplicação de tensões a um material viscoelástico como a madeira resulta inicialmente em deformação elástica instantânea, seguida por um período de deformação retardada sob carga constante, conhecido como fluência. Quando a tensão é removida, parte da deformação desaparece instantaneamente (recuperação elástica) seguida por um período de recuperação parcial retardada conhecido como fluência primária. A parte não recuperável é denominada fluência secundária. A fluência elástica ou primária é devida, em grande parte, à mudança no teor de umidade da madeira sob tensão. A madeira em condições de umidade constante perderá água se for submetida à compressão e ganhará água sob tensão de tração (BARKAS, 1946). A quantidade de fluência secundária é proporcional ao logaritmo do tempo nos estágios iniciais, mas aumenta mais rapidamente além desse período (KING, 1961).

Para a relação entre rigidez e teor de umidade, alguns pesquisadores apresentam um padrão de aumento de cerca de 50% no valor do módulo de rigidez com a redução do teor de umidade de 25% para zero. (THUNELL, 1941; KOLLMANN e KRECH, 1960).

Irace (2011) presume que, à medida que a madeira seca abaixo do ponto de saturação das fibras, a resistência aumenta com a perda de água de impregnação. Os maiores aumentos são na compressão ao longo das fibras. Segundo o autor, a resistência é aproximadamente dobrada quando a madeira é seca para um teor de umidade de 12%, podendo ser triplicada quando seca em estufa.

Dinwoodie (1975) demonstrou que a madeira é anisotrópica em termos de rigidez e retratibilidade. Exatamente pelas mesmas razões anatômicas, a madeira também é anisotrópica em relação à resistência. De acordo com o autor, independentemente do teor de umidade da madeira, o maior grau de anisotropia está na tração. Quando a madeira é tensionada em tração ao longo da fibra, a resistência é maior do que em qualquer outro modo. Correspondentemente, quando tensionados em tração através das fibras (perpendicularmente), as resistências registradas são as mais baixas para todos os modos de tensionamento.

As propriedades de rigidez e resistência da madeira são fortemente dependentes da densidade, quanto maior a densidade, maiores a rigidez e resistência. Isso é óbvio, uma vez que a densidade é uma função da razão entre a espessura da parede celular e o diâmetro da célula. Quando a madeira é carregada além da região elástica, ocorrem mudanças irreversíveis no material. Os limites de proporcionalidade na compressão e na tensão diferem substancialmente.

Acima do limite da proporcionalidade, a madeira se comporta de forma não linear, sendo seu comportamento influenciado por diversos fatores, como densidade, umidade, temperatura e tempo de carregamento (HOLMBERG *et al.*, 1999).

Para compressão perpendicular às fibras, três padrões básicos de falha podem ser distinguidos, dependendo da orientação dos anéis de crescimento em relação à direção de carregamento. Para compressão radial, ocorre falha por esmagamento na zona do lenho inicial. A compressão tangencial resulta em uma flambagem dos anéis de crescimento, enquanto a falha por cisalhamento geralmente ocorre para carregamento em um ângulo em relação aos anéis de crescimento (HOLMBERG *et al.*, 1999).

Uma vez que a madeira raramente é submetida a tração pura em uso comercial, o interesse em sua resistência à tração permanece um tanto acadêmico, embora esta propriedade represente um dos principais atributos deste material. A aplicação mais frequente da tração é no modo de flexão, embora sua resistência à carga de compressão em um plano axial também seja de considerável significado prático (DINWOODIE, 1975).

2.4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Avaliação não destrutiva é a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de material sem alterar suas capacidades de uso final e, em seguida, usar essas informações para tomar decisões sobre as aplicações apropriadas. Essas avaliações contam com tecnologias de testes não destrutivos para fornecer informações precisas relativas às propriedades, desempenho ou condição do material em questão (ROSS, 2015).

O *Stress wave* é uma técnica de classificação mecânica que consiste na aplicação de uma onda de tensão (impacto) no material e na análise do fenômeno de propagação desse estímulo. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesses casos (TARGA *et al.*, 2005). A partir dessa velocidade de propagação de onda, pode-se calcular o módulo de elasticidade, que está relacionado diretamente com a tensão e a deformação do material.

O módulo de elasticidade, além de ser representado pela relação entre a tensão e a deformação, também é referenciado como o ângulo formado pela reta do gráfico da tensão x deformação (Gráfico 1). A reta do diagrama corresponde ao regime elástico, ao longo do qual o material não sofre deformação permanente, e segue a equação da lei de Hooke. A deformação plástica (permanente) ocorre quando são carregadas tensões em níveis mais elevados, até que se atinja a falha ou ruptura (MEREDITH, 1953 citado por KOLLMANN, 1968).



GRÁFICO 1 - CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA MADEIRA.

FONTE: Meredith (1953, citado por KOLLMANN, 1968).

Segundo Holecek *et al.* (2017), o módulo de elasticidade é uma característica essencial que descreve a rigidez da madeira podendo, de acordo com Senalik e Farber (2021), retomar à sua forma original. Quanto maior for o módulo de elasticidade, maior sua resistência à deformação (LIANG e FU, 2007).

Aparentemente, o limite elástico é uma concepção bastante arbitrária. A pequena deformação elástica imposta por um período de tempo pode se transformar em deformações plásticas. Se as deformações aumentarem, os membros estruturais de madeira podem falhar rapidamente, uma vez que não há escoamento de tensões como no aço. As relações entre deformações elásticas ou deformações e tensões dentro de certos limites de tensões são, portanto, de grande importância (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968), haja visto que fornecem informações de resistência e rigidez do material, indicando possíveis empregos da madeira.

O módulo de elasticidade em tração paralela e compressão paralela são, geralmente, considerados iguais. A um teor de umidade de 12%, os valores típicos para madeiras de coníferas e folhosas variam de 7.000 a 14.000 MPa (HARTE, 2009), sendo que o módulo de elasticidade é consideravelmente maior ao longo da fibra (longitudinal) do que no sentido radial ou tangencial (DINWOODIE, 1975).

2.5. DIC – Digital Image Correlation

O método de correlação digital de imagem (DIC) é um método óptico utilizado em medições de deslocamentos e deformações bi ou tridimensionais. Seu princípio está no registro digital de imagens (FRANKOVSKY *et al.*, 2013; MCCORMICK e LORD, 2010). Teorias de correlação para a medição de alterações em dados foram aplicadas pela primeira vez a imagens digitais em 1975 (KEATING *et al.*, 1975), e têm sido otimizadas para serem empregadas em inúmeras aplicações (PAN *et al.*, 2009).

A técnica tem se tornado cada vez mais uma ferramenta analítica para aplicações mecânicas e estruturais em razão do baixo custo e fácil disponibilidade de equipamentos e *software* (XIE e KANG, 2015). Devido à facilidade de preparação das amostras e medições, o DIC substitui dispositivos de medição tradicionais, como *strain gauges*, acelerômetros e transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs).

O DIC funciona comparando fotografias digitais de um componente ou amostra em diferentes estágios de deslocamento. Ao rastrear blocos de pixels, o sistema pode medir o deslocamento da superfície e construir campos vetoriais de deformação 2D e 3D de campo completo e mapas de deformação. Para que o DIC funcione de forma eficaz, os blocos de pixels precisam ser aleatórios e exclusivos com uma variedade de níveis de contraste e intensidade (MCCORMICK e LORD, 2010).

A medição de deslocamentos e deformações pelo método DIC pode ser realizada utilizando um sistema composto por uma, duas ou mais câmeras. O uso de uma câmera permite determinar os deslocamentos e deformações da amostra testada apenas em um plano paralelo ao plano da imagem da câmera (a câmera deve ser posicionada perpendicularmente à superfície testada da amostra), é o chamado correlação de imagem digital bidimensional 2D-DIC (Figura 1a.). O uso de pelo menos duas câmeras gravando a imagem do objeto de teste de diferentes direções permite medir deslocamentos e deformações no espaço tridimensional, e é conhecido por correlação de imagem digital 3D-DIC (Figura 1b.) (TURÓN *et al.*, 2017).

FIGURA 1 - AQUISIÇÃO DE IMAGENS EM (A) 2D E (B) 3D.



FONTE: GOM GmbH, 2017.

A operação básica do DIC é rastrear um padrão (geralmente pulverização) em uma sequência de imagens. O processo de um experimento DIC (Figura 2 – 1, 2 e 3) pode ser dividido em três etapas: (1) obter um padrão na amostra para rastreamento, (2) capturar imagens da amostra durante o deslocamento e (3) analisar as imagens para calcular os deslocamentos da superfície da amostra.

FIGURA 2 - (1) PADRONIZAÇÃO DA REGIÃO PARA RASTREAMENTO; (2) CAPTURA DE IMAGENS EM DESLOCAMENTO; (3) ANÁLISE NO *SOFTWARE GOM CORRELATE*®.



FONTE: Adaptado de Washington (2015).

A análise das imagens é baseada na comparação das imagens antes, durante e após o ensaio de um corpo de prova. As imagens de uma amostra são tiradas à medida que ela se deforma. A ideia é obter uma correspondência entre os pontos materiais nas configurações de referência (imagem inicial não deformada) e atual (imagens deformadas subsequentes) (Figura 3).

FIGURA 3 - VARIAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS.



FONTE: Adaptado de Tang et al. (2012).

Em posse das imagens, seleciona-se um pequeno campo de pixels, chamado *subset*, na primeira imagem. Assim, o *software* busca este campo nas imagens seguintes registrando o

deslocamento sofrido. A escolha de um campo de pixels, e não de apenas um pixel, se dá por ser praticamente impossível rastrear apenas a unidade por ser muito pequena, adotando-se, então, uma área de pixels. Cada área tem uma identidade própria, possuindo uma escala de cinza única. Ao encontrar o *subset* selecionado, o *software* realiza os cálculos necessários e fornece o seu deslocamento em 2D, relacionando as imagens (YONEYAMA e MURASAWA, 2009).

2.6. PRODUTOS DE MADEIRA - Madeira Laminada Colada

A madeira é um material utilizado na construção de vigas, colunas, treliças de telhado, postes, sistemas construtivos como estacas, elementos de laje, bases ferroviárias e para dar forma ao concreto (KERMANI, 1999).

A abundância de recursos dessa matéria prima formou a base para a maioria das casas, edifícios comerciais, pontes e postes de eletricidade em diversos países. Hoje, edifícios residenciais, comerciais e industriais leves são construídos com modernos materiais estruturais de madeira. Recentemente, aumentou o interesse no uso de madeira para vários tipos de estruturas de transporte, incluindo pontes rodoviárias (WACKER, 2021).

A Madeira Laminada Colada (MLC) é um produto engenheirado projetado para uma variedade de aplicações estruturais e arquitetônicas (MOODY e FALK, 1989). O princípio básico deste material consiste em unir várias camadas de madeira dimensionada com adesivos estruturais, a fim de aumentar a resistência e rigidez do membro, e permitir compor estruturas sustentáveis com grande impacto visual (FOSSETTI *et al.*, 2015) (Figura 4).

FIGURA 4 - EDIFICAÇÃO EM MLC, FRANÇA.



FONTE: https://www.simonin.com/en/achieved-projects/beautiful-woods/

A madeira laminada colada apresenta-se como uma técnica indispensável para viabilizar a utilização de madeira de reflorestamento com finalidades estruturais, uma vez que defeitos como nós e rachaduras impossibilitam a utilização de peças maciças. Esta técnica consiste na colagem de lamelas unidas entre si por meio de emendas coladas (MARIN, 2006).

As emendas *finger joint*¹ são um tipo de junta de topo, estruturais ou não, usadas em madeira laminada colada para formar, a partir de peças de madeira serrada, lamelas longas e contínuas (Figura 5), bem como outros componentes de madeira, como treliças e vigas em I (BURK e BENDER, 1989).

FIGURA 5 - EDIFICAÇÃO EM MLC, FRANÇA.



FONTE: https://www.simonin.com/en/achieved-projects/beautiful-woods/

A emenda *finger joint* (Figura 6) é um produto da usinagem de madeira que permite a utilização de peças de menores dimensões na produção de elementos de qualquer tamanho, sendo limitado à capacidade de transporte. Podendo ser empregado para fins não estruturais como em painéis de colagem lateral (EGP – *Edge Glued Panels*), as emendas por entalhes

¹ Neste trabalho, o termo "entalhe(s)" se refere à cada peça entalhada/dentada, também referente a "*finger*", na expressão "*finger joint*".

O termo "emenda(s)" se refere à peça montada/colada, também referenciado a "*joint*", na expressão "*finger joint*".

múltiplos proporcionam muitas vantagens principalmente para produtos estruturais, como a madeira laminada colada (MLC), sua principal aplicação.



FIGURA 6 - EMENDA FINGER JOINT HORIZONTAL EM MADEIRA DE E. grandis.

FONTE: O autor (2022).

2.6.1. Finger joints

O processo *finger joint* da madeira foi desenvolvido empiricamente, usando procedimentos baseados em observações experimentais e abordagens analíticas na ausência de qualquer compreensão detalhada do processo. Esta situação decorre, em primeiro lugar, do comportamento ortotrópico complexo da madeira em comparação com o de outros materiais usados para estruturas de engenharia (por exemplo, aço e concreto) e, em segundo lugar, de sua falta de uso em indústrias de alta tecnologia, como aeroespacial e automotiva (KHELIFA *et al.*, 2015).

Efetivamente, a madeira exibe sua maior resistência no sentido paralelo às fibras. Portanto, desenvolver emendas de topo capazes de transmitir parte significativa dessa resistência tem sido o principal objetivo de diversos trabalhos de pesquisa realizados nesta área (SELBO, 1963; MILNER e YEOH, 1991; SMARDZEWSKI, 1996; SERRANO e GUSTAFSSON, 1999; BOYD, DULIEU-BARTON e RUMSEY, 2006; ÖZÇIFÇI e YAPICI, 2008; FRANGI *et al.*, 2012; GONG, DELAHUNTY e CHUI, 2014).

Para usar a madeira de maneira mais eficaz no desenvolvimento de produtos estruturais com *finger joint*, parâmetros de processos específicos devem ser levados em consideração. O tipo de emenda, as condições de umidade e temperatura dos elementos, bem como o processo de acabamento, devem ser muito bem controlados. O tipo de adesivo, o tempo de cura e a

pressão de colagem também têm grande influência no comportamento mecânico das peças montadas. Vários fatores relacionados à madeira também são conhecidos por afetar a resistência dos entalhes, como a espécie, densidade e defeitos naturais, bem como fatores relacionados ao processo de colagem (KHELIFA *et al.*, 2015).

Segundo Selbo (1963), alguns parâmetros geométricos (Figura 7) são especialmente importantes para a resistência dos *finger joints*. Por exemplo, a força aumenta quando a proporção do comprimento do entalhe / largura do passo aumenta e quando a largura da ponta do entalhe diminui. Assim, o uso de emendas por entalhes múltiplos com inclinação suficientemente baixa pode render 85% a 90% da resistência da madeira sólida. Como resultado, as emendas *finger joint* estruturais devem ter entalhes relativamente longos com pontas finas (KHELIFA *et al.*, 2015).





FONTE: Adaptação da norma ASTM D 7469-16.

A emenda *finger joint* é o tipo mais comum de junta de extremidade adesiva, devido à sua facilidade de montagem e manuseio de produção. Estas emendas foram usadas nas madeiras sólidas de facetas e relataram eficiências que variam de 50% a 90% (ERICKSON, 1941; LUXFORD e KRONE, 1946; RICHARDS e GOODRICK, 1959; SELBO 1962; SELBO, 1963; MOODY e BOHANNAN, 1971). A eficiência depende das propriedades mecânicas dos materiais nas emendas e da maneira como elas são unidas (GROOM e LEICHTI, 1994).

A resistência dos *finger joints* depende de vários fatores interligados relacionados ao processo de colagem, como taxa de espalhamento da cola, tempo de montagem e pressão aplicada (BOURREAU *et al.*, 2013). Além disso, a densidade específica da madeira, o planejamento e a espessura da lamela afetam a resistência das emendas por entalhes múltiplos (TRAN *et al*, 2014). A otimização da geometria do *finger joint*, bem como dos adesivos ou dos parâmetros de produção, como pressão de colagem ou tempo de prensagem, pode levar a maiores resistências das emendas múltiplas (FRANKE *et al*, 2014).

2.6.1.1. Fatores que interferem no processo

Diversos são os fatores que interferem no seu processo produtivo, como a geometria dos entalhes, pressão de colagem, adesivo, densidade da madeira, bem como a manutenção dos equipamentos utilizados para sua confecção, haja vista que estes comprometem a qualidade do produto final, seja por geometria desigual, pressão mal aplicada ou devido a outro aspecto.

Tran *et al.* (2014) e Bustos *et al.* (2011) observaram que a resistência de peças com emendas *finger joint* foram influenciadas pela geometria da amostra, pela pressão de colagem, dentre outros fatores. Segundo Frihart e Hunt (2010), se bem fabricadas, usando parâmetros de usinagem adequados, este tipo de emenda possibilita atingir até 75% da resistência da madeira maciça.

É importante garantir que a geometria da emenda preserve as características adesivas necessárias e que a mesma esteja situada em locais em que as forças axial e transversal são dominantes, evitando cargas de flexão e torção. Deve-se garantir que a junta colada com adesivo não se torne o elo fraco (SMARDZEWSKI, 1996).

A resistência à tração de um *finger joint* em madeira tem demonstrado ser uma função de quatro parâmetros: geometria da emenda; propriedades mecânicas dos aderentes e cola; fabricação; e propriedades mecânicas e físicas da linha de cola (SELBO, 1963).

2.6.1.2. Densidade e teor de umidade

A densidade é um dos fatores críticos na produção de emendas por estar relacionado à usinagem dos entalhes, ao processo de colagem, incluindo a pressão aplicada, e à resistência de toda a junta. Quanto à usinagem, madeiras de maior densidade são mais difíceis de cortar e, portanto, a geometria do entalhe pode ficar desigual (Figura 8). Sales (1990) afirma que a densidade está relacionada com a resistência mecânica da madeira e a dificuldade de penetração
do dente da serra, exercendo influência direta sobre o esforço do corte. O esforço de corte em madeiras muito densas chega a cinco vezes quando comparado ao esforço em madeira macia.



FIGURA 8 - GEOMETRIA DESIGUAL EM EMENDA FINGER JOINT.

Flecha branca indica espessura correta, flecha azul indica espessura menor. FONTE: O autor (2022).

A densidade da espécie está diretamente relacionada com a sua porosidade e permeabilidade, influenciando assim o grau de rugosidade e as funções de mobilidade, fatores determinantes na formação da ligação adesivo-substrato (MARIN, 2006).

A pressão de colagem deve levar em conta a densidade da madeira para permitir o travamento entre os entalhes sem que ocorra fissura longitudinal da madeira na base da emenda.

Assim como a emenda *finger joint* feita de madeira de baixa densidade tende a falhar na madeira, aquelas feitas de madeira de alta densidade falham em juntas nas quais a força da colagem governa (WALFORD, 2000).

O teor de umidade da madeira pode afetar as propriedades das ligações adesivas e, por consequência, os produtos de madeira colada (SELBO, 1963). Grande quantidade de extrativos e alta densidade diminuem a penetração do adesivo na madeira, também, baixo teor de umidade pode provocar linha de cola "faminta", ou ainda, a cura imediata por absorver a água do adesivo. Diferenças de umidade entre as partes da emenda devem ser evitadas principalmente devido à retratibilidade da madeira (STÜPP, 2016).

2.6.1.3. Adesivo

A adesão entre a madeira e o adesivo depende de uma série de fatores como as características inerentes à própria madeira (anatomia, química e física), características do adesivo (químicas e físicas) e do processo adotado durante a colagem (ALBINO, 2010).

Embora as aplicações mais comuns de adesivos na indústria madeireira estejam principalmente relacionadas à fabricação de produtos de madeira engenheirada, seu uso para a montagem de juntas estruturais está se tornando cada vez mais importante na construção em madeira. Isso é particularmente verdadeiro na fabricação de Madeira Laminada Colada (MLC), por meio do qual os membros de maior rigidez e resistência são produzidos usando o processo de emendas por entalhes múltiplos, ou *finger joints* (KHELIFA *et al.*, 2015).

A espessura da linha de cola tem apenas um efeito menor nas principais tensões adesivas. Não apenas os principais padrões de distribuição de tensões adesivas permanecem inalterados pela espessura do adesivo, como também a magnitude não é afetada (GROOM e LEICHTI, 1994).

A linha de cola é muito mais sensível a mudanças nas propriedades do material do que os aderentes. Linhas de cola mais rígidas (rigidez da linha de cola é uma função das proporções dos módulos elásticos (E e G) e a espessura da linha de cola) produzem tensões maiores na linha de cola (JAUSLIN *et al.*, 1995).

2.6.1.4. Geometria

O perfil dos entalhes (Figura 6) é o fator crítico na determinação da resistência da emenda entre a densidade da madeira, adesivo e pressão de colagem (MOHAMMAD, 2004). A variação do perfil da emenda múltipla mostra em parte um aumento do nível de resistência pelo aumento do comprimento do entalhe (FRANKE *et al*, 2014).

Existem quatro variáveis no projeto de uma emenda *finger joint*: passo, comprimento, inclinação e espessura da ponta. Essas variáveis estão tão relacionadas que não se pode alterar uma variável sem que as outras três também sejam alteradas (JOKERST, 1981).

O ângulo da emenda também influencia a resistência do entalhe. A superfície de ligação do *finger joint* aumenta com ângulos menores. No entanto, as concentrações de tensão podem se sobrepor às pontas dos entalhes vizinhos (FRANKE *et al.*, 2014). Selbo (1963) testou a resistência à tração de emendas *finger joint* em duas espécies de baixa densidade (*Picea sitchensis* e Douglas-fir) e uma madeira densa (carvalho branco) em função de determinados

parâmetros geométricos, como ângulo, comprimento do entalhe (L), largura da base (P) e largura da ponta (t). Ele concluiu que, para um ângulo constante, a resistência à tração das emendas aumenta com o aumento do comprimento e da relação comprimento do entalhe/largura da base e com a diminuição da largura da ponta. Madsen e Littleford (1962) encontraram resultados semelhantes em testes na madeira Douglas-fir.

2.6.1.5. Processo de usinagem

Macêdo (1996) afirma que a emenda raramente alcançará o desempenho esperado se não for produzida adequadamente. Um dos aspectos mais importantes do processo de produção é a operação de usinagem. O tipo de equipamento usado e a qualidade da superfície obtida tem fundamental influência sobre a resistência da emenda. Segundo o autor, após o desgaste inicial do equipamento de corte, as superfícies de colagem tornam-se mais rugosas e retas, produzindo maior atrito na linha de cola, melhor encaixe e, portanto, emendas mais resistentes.

Uma vez usinados os entalhes múltiplos, é necessário se proceder a colagem dessa emenda longitudinal quase que imediatamente após a usinagem. Isto, para evitar variações na geometria dos entalhes devido ao movimento de retratibilidade da madeira (VALLE *et al*, 2015).

2.6.1.6. Pressão de colagem

A pressão é necessária para garantir o contato mais próximo possível entre as superfícies dos entalhes a serem colados e para que o adesivo forme uma fina camada contínua de espessura uniforme, sem prejudicar a resistência da madeira. A quantidade e a duração da pressão dependem do tipo e da viscosidade do adesivo, espécie de madeira (densidade e resistência à compressão), tipo de junta e uso pretendido do produto colado (TSOUMIS, 1991).

Existem várias opiniões sobre a pressão ideal necessária para produzir *finger joints* de alta resistência. A norma alemã DIN 68-140 (1971) especifica valores mínimos aceitáveis para os diferentes comprimentos dos entalhes (BUSTOS *et al.*, 2011) (Gráfico 2).



FONTE: Adaptação da norma DIN 68140/1971 (STÜPP, 2016).

Assim, quanto maior o comprimento, menor a pressão de colagem necessária. Isto acontece porque à medida que o comprimento aumenta, há maior contato e pressão lateral entre entalhes. Portanto, não é necessária excessiva quantidade de força (STÜPP, 2016). Por outro lado, a referida norma considera apenas o comprimento dos entalhes e o fato de ser conífera ou folhosa, sem levar em conta outros fatores importantes, como a densidade da madeira propriamente dita.

A norma brasileira em revisão NBR 7190 (ABNT, 2013) (Tabela 1, ainda sem valor normativo) sugere pressões de colagem considerando o comprimento dos entalhes e os grupos de densidade maior ou igual/menor que 0,5 g/cm³.

I. (Pressão de colagem (MPa)			
L_d (IIIII)	Densidade $\leq 0,50 \text{ g/cm}^3$	Densidade > $0,50 \text{ g/cm}^3$		
10	12	14		
20	8	10		
30	6	8		
40	4,5	6,5		
50	3	5		
60	2	4		

Onde: L_d: comprimento dos entalhes. FONTE: NBR 7190 (ABNT, 2013).

Bustos *et al.* (2003) e Madsen e Littleford (1962) acreditam que as emendas *fingerjoints* têm o melhor desempenho com uma pressão de colagem de acordo com a espécie da madeira e, consequentemente, sua densidade. Pressões mais baixas ou mais altas podem resultar em menor resistência à tração. Pavlov (1954 citado por JOKERST, 1981) observou que, por causa do atrito desenvolvido na compressão nas superfícies laterais, o entalhe é impedido de movimento longitudinal. Portanto, ao colar, bastaria aplicar uma pressão de colagem inicial, e a cura do adesivo ser feita fora da prensa. A pressão necessária em um *finger joint* depende da viscosidade da cola e da qualidade do encaixe dos entalhes que, bem ajustados, mostraram uma alta resistência em baixas pressões de colagem.

Bustos *et al.* (2011) avaliaram o efeito da pressão de colagem no desempenho de *finger joints* horizontais por meio de análise microscópica de varredura. Os autores perceberam que a folga na ponta dos entalhes diminui na medida em que a pressão aumenta. Segundo eles, em pressões de colagem mais altas esse efeito diminui levemente até um limite, haja visto que há, então, a incompressibilidade do adesivo dentro das folgas já reduzidas. Para pressões de colagem baixas, os pesquisadores notaram a formação de bolhas de ar devido ao excesso de folga por fazer parte da descontinuidade dentro da emenda colada. Foram observadas, também, rachaduras nas extremidades quando a pressão foi aumentada.

Uma vez que uma alta pressão conduz à eficiência da ação de travamento, a maior pressão possível deve ser usada, desde que a linha de cola não seja adversamente afetada e não ocorram danos à madeira, como rachaduras e falhas de compressão (FISETTE e RICE, 1988). Enquanto o aumento da pressão de colagem até um certo nível dá um melhor contato dos entalhes para obter emendas fortes, danos às células ou ruptura na base podem ser induzidos devido à pressão excessiva (KUTSCHA e CASTER, 1987; MARRA, 1984; JOKERST, 1981).

Frihart e Hunt (2010) afirmam que a pressão aumenta o umedecimento, forçando o adesivo líquido a fluir sobre as superfícies, deslocar os bloqueios de ar e penetrar na madeira sólida. Para Konnerth *et al.* (2006), os espaços na frente das pontas dos entalhes são preenchidos parcialmente com resina, mas não podem ser consideradas áreas de transmissão de tensão.

2.6.1.7. Concentração de tensões

Os principais fatores que causam a concentração de tensões nas emendas são a geometria, devido à largura da ponta do entalhe, e o adesivo, relacionado à rigidez da cola e à espessura aplicada no aderente. Conforme explicam Groom e Leichti (1994), a rigidez e a espessura adesivas têm um efeito significativo sobre como as tensões são transferidas entre os aderentes. O fato de as pontas dos entalhes serem ligeiramente mais largas que a base de encaixe faz com que naturalmente ocorram tensões durante a pressão de colagem. Jauslin *et al.* (1995)

afirmam que as concentrações de tensão surgem com qualquer largura de ponta diferente de zero.

Franke *et al.* (2014) também acreditam que a superfície de adesão diminui com o aumento da largura da ponta do entalhe. As concentrações de tensão perpendicular às fibras aumentam com o aumento da largura da ponta. Devido às concentrações de tensões próximas às pontas dos entalhes serem o fator mais relevante que afeta o desempenho das emendas, é necessário realizar estudos para obter informações úteis (MILNER e YEOH, 1991).

Uma linha de cola rígida, em relação à rigidez dos aderentes, tende a aumentar as concentrações de tensão nas bordas de todos os entalhes. Nos aderentes, esse efeito é relativamente pequeno, os picos de tensão na linha de cola aumentam dramaticamente (JAUSLIN *et al*, 1995).

Milner e Yeoh (1991) consideram, ainda, que a redução do módulo de elasticidade do adesivo reduz as concentrações de tensões. O efeito da espessura da cola é semelhante ao da rigidez adesiva; as tensões estão concentradas na base das emendas, e as tensões aderentes radiais diminuem com camadas adesivas mais finas (GROOM e LEICHTI, 1994).

2.6.1.8. Distribuição de tensões

A mecânica das ligações adesivas em madeira e compósitos de madeira é um aspecto que merece mais atenção. Embora a penetração do adesivo no substrato de madeira seja bem documentada, não está totalmente claro como a presença do adesivo nas cavidades celulares afeta a distribuição da tensão e da deformação em uma ligação adesiva. A penetração do adesivo aumenta significativamente o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento da interface madeira-adesivo. Esses efeitos são mais pronunciados com adesivos de alto módulo do que com adesivos de baixo módulo de elasticidade (GINDL *et al.* 2005).

Khelifa *et al.* (2015) confirmaram com análise numérica, que o modo de falha previsto foi semelhante ao experimental investigado. A falha ocorreu inicialmente devido ao adesivo utilizado na colagem do *finger joint*, ocorrendo nas linhas de emenda adesiva próximas à face inferior do corpo de prova, que corresponde à zona de tração máxima, e propagou-se em direção à face superior correspondente à zona de compressão, levando à abertura progressiva da emenda.

Leichti (1988) modelou emendas estruturais sob carga de tração usando o método dos elementos finitos e a teoria da resistência. O autor mostrou que as distribuições de tensão estão relacionadas à geometria do entalhe, com a primeira falha provavelmente ocorrendo no adesivo

ou na interface aderente do adesivo nas pontas dos entalhes em níveis de tensão relativamente baixos.

Um dos métodos analíticos para examinar a concentração e distribuição de tensões nas juntas adesivas é o método dos elementos finitos (MEF).

2.7. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

De acordo com Mackerle (2005), as ligações na madeira podem, muitas vezes, ser o ponto mais fraco na estrutura, resultando em uma redução global de sua resistência. O conhecimento das propriedades mecânicas das ligações de madeira é, portanto, necessário. O Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta adequada para estudar o desempenho mecânico das uniões reforçadas e não reforçadas, afetadas por diversos parâmetros.

Muitos estudos numéricos e analíticos já foram realizados em relação à modelagem do comportamento mecânico das emendas *finger joint* e podem ser encontrados em pesquisas como de Yeh e Lin (2012) e de Ratnasingam e Scholz (2009).

Comparações empíricas entre adesivos e ligações longitudinais não demonstram a distribuição de tensões, limitam as alternativas e produzem resultados suplementares devido à variabilidade inerente da madeira. O desenvolvimento de modelos numéricos de emendas por entalhes múltiplos contribui para a compreensão dos mecanismos de transferência de tensões e dos efeitos dos parâmetros das ligações, tais como a geometria e as propriedades dos materiais (GROOM & LEICHTI, 1994).

Um dos métodos numéricos de avaliação da distribuição das tensões em ligações coladas mais comum é o método dos elementos finitos. Alguns estudos combinaram padrões de distribuição de tensões pelo método dos elementos finitos de juntas coladas com a energia necessária para a ruptura, de modo a quantificar as concentrações de tensões que ocorrem no local.

Segundo Cook *et al.* (1989), o método dos elementos finitos é um procedimento numérico de análise de estruturas e do contínuo. Normalmente o problema abordado é muito complicado para ser resolvido satisfatoriamente por métodos numéricos clássicos, podendo estar relacionado à análise de tensões e deformações, condução de calor ou qualquer uma das várias outras áreas. O método consiste em dividir um domínio em partes para obter soluções aproximadas de um problema de valor de contorno apresentado na forma de equações diferenciais parciais com alta qualidade (PAN e XU, 2011).

Khelifa *et al.* (2015) encontraram uma boa correlação entre os resultados previstos e os experimentais quando compararam as curvas de carga/deflexão numérico e experimental. Para cada caso, a maior diferença entre as cargas finais calculadas e experimentais foi em torno de 5%. Portanto, o modelo de elementos finitos dos autores foi capaz de predizer corretamente o comportamento das amostras.

Com diferentes objetivos, diversas pesquisas têm sido feitas com a aplicação de MEF em emendas longitudinais, sendo as mais difundidas: Milner e Yeoh (1991), Groom e Leichti (1994), Pellicane *et al.* (1994), Jauslin *et al.* (1995), Smardzewski (1996), Serrano (2009) e, mais atualmente, Franke *et al.* (2014), Tran *et al.* (2014), Khelifa *et al.* (2015), Said (2018) e Said *et al.* (2018).

A simulação em elementos finitos demanda a inclusão das propriedades tecnológicas do material, tais como características mecânicas (coeficientes elásticos e plásticos, entre muitos outros), térmicas (condutividade, por exemplo), físicas (densidade etc.), entre muitas outras. Algumas simplificações destas características são possíveis e muito comuns, como considerar a isotropia da madeira, ao invés da anisotropia e/ou ortotropia. A análise pode ser feita utilizando *softwares*, como o *Abaqus*® e o *Ansys*®.

O modelo constitutivo elástico mais geral formulado para descrever o comportamento mecânico do material é o modelo anisotrópico. Esse tipo de modelo implica que não há simetria do material e que as propriedades mecânicas em certas direções são diferentes. Por outro lado, se houver simetria do material, este pode ser denominado, por exemplo, ortotrópico ou isotrópico. Neste contexto, a adequação de um determinado material a um determinado modelo elástico baseia-se na existência de eixos de simetria elástica. Nestes eixos, denominados eixos principais elásticos, há invariância das relações constitutivas sob um conjunto de transformações de eixos coordenados (MASCIA e LAHR, 2006).

Hu *et al.* (2019) consideram que as constantes elásticas e limite de resistência proporcional da madeira são pré-requisitos para estabelecer o modelo numérico de produtos de madeira e construções de madeira.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. MATÉRIA-PRIMA

A madeira utilizada, da espécie *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden), comercializada sob o nome Red Grandis®, foi oriunda de processos produtivos realizados por duas empresas em Rivera, norte do Uruguai, as quais controlam todas as etapas de desenvolvimento das árvores no povoamento. A seleção do material genético utilizado para o plantio das árvores teve início com a escolha das sementes e, atualmente, as mudas são obtidas por reprodução vegetativa. O povoamento foi conduzido com manejo e correção do solo, controle de vegetação indesejada, podas e desbastes seletivos. Quando as árvores atingiram 22 anos foi realizado o corte raso.

Na serraria, as toras foram medidas e classificadas por um *scanner* para otimização do desdobro. As pranchas produzidas foram agrupadas conforme qualidade visual (defeitos da madeira) e dimensões, e encaminhadas para a secagem em estufas, onde permaneceram até atingirem umidade de equilíbrio de 12%. Secas, as tábuas foram embaladas e transportadas até uma empresa de madeira laminada colada (MLC), onde as amostras desta pesquisa foram produzidas.

3.1.1. Preparo dos corpos de prova maciços²

Para a produção das amostras desta pesquisa, do lote de madeira disponível na empresa, foram selecionadas algumas tábuas de acordo com a proporção de cerne e alburno, de modo que não houvessem os dois em um mesmo corpo de prova. Posteriormente, foram escolhidas as peças com teor de umidade mais semelhante, em torno de 11 e 12% e variação de até 1%, determinado com um medidor de umidade Marrari considerando densidade de 0,50 g/cm³. Levando em conta estes dois modos de classificação, foram selecionadas as peças com peso similar, visando diminuir efeitos não controlados no desempenho das amostras. O objetivo deste processo de seleção do material era reduzir o comportamento por efeitos não controlados das amostras.

² Nesta pesquisa, os termos "maciço(s)" e "madeira maciça" se referem à madeira sólida, sem entalhes/emendas *finger joint*. As peças com emendas *finger joint* foram produzidas com madeira sólida, mas aqui estão referenciadas com algum dos seguintes termos: "emendas *finger joint*, entalhes múltiplos, emendas por entalhes múltiplos". Ou seja, as peças com emendas *finger joint* não estão referenciadas por "sólida" ou "maciça".

As peças foram aplainadas e serradas para a redução, sobretudo do comprimento, e separadas proporcionalmente ao tamanho da amostra de cada análise. Finalmente, foram usinadas nas dimensões finais do corpo de prova, conforme a norma correspondente a cada ensaio.

Posteriormente, as peças foram transportadas para o Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM) na Universidade Federal do Paraná (UFPR), onde permaneceram acondicionadas em câmara de climatização controlada por 24 meses (Figura 9), sob temperatura de 20 °C e umidade relativa de 60%, não havendo variação das condições ambientais.

FIGURA 9 - CORPOS DE PROVA EM CÂMARA CLIMATIZADA.



FONTE: O autor (2022).

3.1.1.1. Determinação das propriedades físicas e mecânicas

A Tabela 2 mostra as normas consultadas para cada procedimento de ensaio das propriedades físicas e mecânicas, bem como as dimensões e quantidade de amostras utilizadas em cada ensaio.

	Procedimento	Norma	Dimensões dos corpos de prova (mm)	Número de amostras	
Amostras maciças	Avaliação da densidade básica e retratibilidade	ASTM D 2395 (2017)	20 x 30 x 50	12	
	Teste de tração paralela	ASTM D 4761 (2019)	20 x 50 x 450	20	

TABELA 2 - NORMAS UTILIZADAS E NÚMERO DE CORPOS DE PROVA POR ENSAIO.

	Teste de compressão paralela		50 x 50 x 150	20	
	Alteração da seção central das amostras com emendas <i>finger joint</i>	ASTM D 7469 (2016)	Seção central 20 x 35	-	
Amostras <i>finger joint</i>	Teste de tração paralela em peças com emendas <i>finger</i> <i>joint</i> e modos de ruptura das emendas	ASTM D 4688 (2014)		25	
	Total de amostras				

FONTE: O autor (2022).

A avaliação das propriedades físicas foi realizada a partir da determinação das seguintes variáveis: densidade básica, contração e inchamento, anisotropia, e coeficiente de retratibilidade.

Os procedimentos adotados consistiram na pesagem e mensuração das dimensões dos 12 corpos de prova avaliados. Inicialmente, as amostras em umidade de equilíbrio de 12% foram pesadas em balança de precisão de 0,01 grama, e medidas com paquímetro digital com precisão de 0,01 milímetro. Em seguida, as peças foram saturadas por imersão em água, a qual era trocada a cada 2 dias. Novas medições foram feitas quando a variação do peso foi menor que 0,5% em 24 horas. As amostras foram, então, colocadas para perda de água em câmara climatizada por 12 meses e, posteriormente, em estufa de secagem forçada com temperatura de 103 ± 2 °C, até que não houvesse mais variação de peso. Os corpos de prova foram colocados em dessecador para diminuição da temperatura das amostras sem que houvesse absorção de umidade do ambiente e, finalmente, retiradas uma a uma para a coleta dos valores das dimensões e do peso a 0% de umidade.

As dimensões das amostras de densidade básica (2 cm x 3 cm x 5 cm) eram condizentes com a norma ASTM D 2395 (2017) – Density and Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials - que admite tamanhos em que se consiga medir as variações sofridas pelos corpos de prova. Embora a norma ASTM D 143 (2000), que trata da retratibilidade e gravidade específica, estabelece que as amostras tenham 5 cm (transversal) x 5 cm (radial) x 15 cm (longitudinal), para as análises de inchamento, contração, retratibilidade e anisotropia, foram utilizadas as mesmas peças que as usadas para a densidade básica, de 2 cm (transversal) x 3 cm (radial) x 5 cm (longitudinal).

A densidade básica foi calculada utilizando a seguinte equação (1):

$$\rho_{bas} = \frac{m_0}{v_v} \tag{1}$$

Onde:

 ρ_{bas} = densidade básica (g/cm³) m_0 = massa seca a 0% de umidade (gramas) v_v = volume verde (saturado) (cm³)

O coeficiente de retratibilidade foi estimado a partir da equação (2):

$$Q = \frac{(l_{12} - l_0) P_0}{(P_{12} - P_0) l_0}$$
(2)

Onde:

Q = Coeficiente de retratibilidade (%/%)

 $l_{12} \ e \ l_0 =$ dimensões da amostra a 12% e 0% de teor de umidade

 $P_{12} e P_0$ = massa da amostra a 0% e 12% de umidade, respectivamente

(%/%) = variação da dimensão considerada, em porcentagem, para cada 1% de variação no teor de umidade da madeira.

A contração e o inchamento volumétricos foram calculados com as equações (3 e 4):

$$\beta_{\nu} = \frac{(\nu_{100} - \nu_0)}{\nu_{100}} * 100 \tag{3}$$

$$\alpha_{\nu} = \frac{(v_{100} - v_0)}{v_0} * 100 \tag{4}$$

Onde:

 $\beta_v = \text{contração volumétrica máxima (%)}$

 α_v = inchamento volumétrico máximo (%)

- v_{100} = volume úmido (100%)
- $v_0 =$ volume seco (0%)

O fator de anisotropia de contração (equação 5) e inchamento (equação 6) é expresso pela relação entre os movimentos lineares tangencial e radial, considerando 0% e 100% de umidade:

$$A_c = \frac{\beta_t}{\beta_r} \tag{5}$$

$$A_i = \frac{\alpha_t}{\alpha_r} \tag{6}$$

Em que:

 A_c = Anisotropia de contração (adimensional)

- A_i = Anisotropia de inchamento (adimensional)
- β_t = contração tangencial (%)
- $\beta_r = \text{contração radial (%)}$
- α_t = inchamento tangencial (%)
- α_r = inchamento radial (%)

As propriedades mecânicas avaliadas nas amostras maciças foram: resistência à tração paralela às fibras e compressão paralela à fibras. Para cada uma delas foram utilizadas 20 amostras. No caso do ensaio de tração paralela foi considerada a possibilidade de escorregamento do corpo de prova durante o ensaio, o qual pode ocorrer devido à força necessária para prender as extremidades da amostra nas garras do equipamento. Entende-se, portanto, que as tensões diferem entre cada corpo de prova. Sendo assim, os testes realizados foram escolhidos no entendimento de que as tensões não sofrem interferências de outras solicitações, como é o caso do ensaio de flexão, onde há tensões de tração, compressão e cisalhamento.

Foi medida a velocidade de uma onda de impacto sobre cada amostra de tração paralela com o *stress wave timer* a fim de estimar o módulo de elasticidade dinâmico por método não destrutivo (Figura 10).



FIGURA 10 - PREPARAÇÃO DA AMOSTRA NO EQUIPAMENTO STRESS WAVE TIMER.

FONTE: O autor (2022).

As velocidades das ondas foram medidas com equipamento da Metriguard, Modelo 239A, composto por dois transdutores acelerômetros dispostos sobre o material a ser medido e um relógio registrador, zerado anteriormente a cada medição. Após a liberação de um pêndulo metálico, este entra em choque com o primeiro acelerômetro gerando a onda que percorre a amostra até alcançar o receptor, segundo acelerômetro, que envia a informação de velocidade para o relógio registrador. O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado a partir da equação (7):

$$E_{din} = V^2 \rho \, \frac{1}{g} \tag{7}$$

Onde:

 $E_{din} = M \acute{o} du lo de elasticidade dinâmico (Kgf/cm²)$

V = velocidade de propagação da onda (m/s)

 $\rho = massa específica (kg/m^3)$

g = aceleração da gravidade (m/s²)

Fator de conversão: 1 kgf/cm² = 0,098 MPa

Os ensaios das propriedades mecânicas das amostras foram executados de acordo com os procedimentos da norma técnica ASTM D 4761 (2019). Segundo a referida norma, o comprimento entre garras das amostras dos ensaios de tração paralela dependerá do objetivo dos testes e do material a ser testado. Recomenda, porém, que a distância entre os suportes do equipamento seja, preferencialmente, 25 vezes a espessura do corpo de prova, não devendo ser menor que 12 vezes a espessura devido às limitações dos equipamentos. A indicação é que as amostras sejam testadas com as dimensões da seção transversal comercial. Por fim, a taxa de carregamento deve ser tal que a ruptura seja alcançada em aproximadamente 1 minuto, não devendo ser em menos de 10 segundos, nem ultrapassar 10 minutos. Geralmente, a velocidade de 30 MPa/min permite a ruptura acontecer no tempo estabelecido.

Neste estudo os corpos de prova de tração paralela às fibras, de dimensões 2 cm x 5 cm x 45 cm (espessura, largura e comprimento), sofreram diminuição da seção central, que passou a ser de 0,7 cm x 3,5 cm, espessura e largura, respectivamente (Figura 11b), conforme sugerido por Szücs *et al* (1998). Os referidos autores sugerem a usinagem em duas etapas (Figura 11a) de mesma profundidade em cada uma das faces, devido à ocorrência comum de esmagamento das extremidades das amostras pelas garras do equipamento ou de ruptura por concentração de tensões nas seções próximas às extremidades, região que define a seção enfraquecida dos corpos de prova. Com isto, os problemas de ruptura por concentração de tensões do corpo de prova é minimizado.

FIGURA 11 - PROCESSO DE REDUÇÃO DE SEÇÃO DAS AMOSTRAS.



Onde: a. Redução de seção em tupia de alta rotação; b. Corpo de prova de tração paralela às fibras com seção central reduzida. FONTE: O autor (2022).

Para o ensaio de compressão paralela às fibras o comprimento das amostras deve ser, no mínimo, 2,5 vezes maior que a dimensão transversal. Quanto à seção transversal, as recomendações são as mesmas que para o teste de tração, mantendo-se as proporções comerciais. As dimensões das amostras de compressão paralela produzidas foram de 5 cm x 5 cm x 15 cm (Figura 12). A velocidade de ensaio foi de 0,7 mm/min. Com os resultados foi calculado o módulo de elasticidade estático à compressão paralela às fibras a partir da equação 8.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{8}$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade (MPa)

 $\sigma = tensão (MPa)$

 $\varepsilon = deformação (adimensional)$

FIGURA 12 - DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*.



FONTE: O autor (2022).

Anteriormente ao ensaio de cada amostra, foi determinada a densidade aparente para posteriormente correlacionar com o resultado mecânico. Este procedimento foi feito para ambos os ensaios: tração paralela às fibras e compressão paralela às fibras.

3.1.2. Produção de emendas finger joint

Foram produzidas 25 amostras com emendas por entalhes múltiplos. A produção teve início com a fresagem horizontal das amostras utilizando fresa com geometria do *finger joint* de 21 mm de comprimento (Figura 13). Assim como procedido com as amostras maciças, foi determinada a densidade aparente de cada corpo de prova a fim de relacionar esta variável com as propriedades de resistência mecânica obtidas nas amostras, interpretar e correlacionar o comportamento de cada uma.

FIGURA 13 - FINGER JOINT RECÉM FRESADO.



FONTE: O autor (2022).

Utilizado pela empresa, o adesivo aplicado na colagem (Figura 14) foi a melamina uréia formaldeído (MUF), bicomponente de proporção 1:1, de aplicação separada devido ao *pot-life* de 8 minutos. Conforme instrução do fabricante, a viscosidade do adesivo pode variar de 10000 - 25000 mPas, e de 1700 - 2700 mPas para o catalisador. Com densidade aproximada de 1270 kg/m³, o adesivo tem pH entre 9,5 e 10,7. O catalisador apresenta densidade de 1070 kg/m³ e pH entre 1,3 e 2,0. Os procedimentos para cálculo e controle da gramatura foram feitos segundo os critérios recomendados pelo fabricante, de 400 g/m².

FIGURA 14 - APLICADOR DO ADESIVO NAS EMENDAS FINGER JOINTS.



FONTE: O autor (2022). Círculo branco indica o aplicador do adesivo.

Conforme recomenda a norma EN 385 (2001), as amostras fresadas devem ser coladas o mais breve possível, não ultrapassando 24 horas após o corte. Sendo assim, para prevenir

possíveis alterações de geometria devido à anisotropia da madeira, e problemas de colagem como deposição de poeira na superficie, as amostras foram coladas imediatamente após a fresagem. Em seguida, as amostras foram prensadas com aplicação de 10 MPa (EN 385-2001) durante 2 segundos (Figura 15) e, então, acondicionadas para a cura do adesivo. Conforme o fabricante, o tempo de cura inicial foi de 1 hora e 5 minutos, e final de 10 horas, o que assegura a eficiência da colagem.



FIGURA 15 - PRENSAGEM DE DUAS PEÇAS COM ENTALHES FINGER JOINT.

A fim de minimizar o efeito da resistência da madeira ao avaliar a emenda *finger joint*, a ASTM D 7469 (2016) permite retrabalhar as amostras em seções transversais menores. Assim, após o processo de fabricação das emendas, que envolveu a colagem, pressão de colagem e cura do adesivo, a largura foi alterada de 5 cm para 3,5 cm devido ao sentido horizontal dos entalhes. A espessura e o comprimento permaneceram 2 cm e 45 cm, respectivamente (Figura 16).

FONTE: O autor (2022).

FIGURA 16 - AMOSTRAS DE TRAÇÃO PARALELA COM REDUÇÃO DE SEÇÃO: (1) REDUÇÃO DA ESPESSURA – AMOSTRAS *FINGER JOINT*; (2) REDUÇÃO DA ESPESSURA E LARGURA – AMOSTRAS MACIÇAS.



FONTE: O autor (2022).

Foram, então, realizados ensaios de tração paralela às fibras de acordo com procedimentos da Norma técnica ASTM D 4688 (2014) a fim de verificar a resistência das amostras e qualidade do processo de produção do *finger joint* no que concerne geometria, adesivo e pressão de colagem. Os testes foram executados até a ruptura da amostra com velocidade de 5 mm/min.

Após os ensaios, foram determinados os modos de ruptura das amostras *finger joint* conforme recomenda a norma ASTM D 4688 (2014), que os divide em 6 tipos, conforme Tabela 3.

Modo	Descrição	Exemplo
1	Ruptura ao longo das superfícies da linha de cola com poucas falhas (ruptura na madeira < 70%).	
2	Ruptura ao longo das superfícies da linha de cola com considerável ruptura por cisalhamento (ruptura na madeira >70%).	

TABELA 3 - MODOS DE RUPTURA DE AMOSTRAS *FINGER JOINT* PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS (ASTM D 4688-2014).

3	Ruptura ao longo do perfil da emenda, mas com ruptura na base dos entalhes. Considerável ruptura por cisalhamento em toda a superfície do perfil.	
4	Ruptura na base das emendas. Poucas falhas ao longo do perfil.	
5	Ruptura que começa na emenda e prossegue fora dela. Praticamente 100% das rupturas são na madeira.	
6	Ruptura fora da emenda. Não influenciada pela emenda. Toda a ruptura é na madeira.	

FONTE: ASTM D 4688 (2014).

Finalmente, foi calculada a perda de resistência da emenda *finger joint*, obtida a partir do grau de enfraquecimento e dos resultados de resistência da madeira maciça de tração paralela às fibras. O grau de enfraquecimento está relacionado diretamente à geometria da emenda *finger joint* e é calculado pela razão entre espessura da ponta do entalhe e a largura da base.

A perda de resistência é calculada a partir da equação (9):

$$pr = 100 - \frac{rf^{*100}}{rm} \tag{9}$$

Onde:

Pr = perda de resistência (%)

rf = resistência real da amostra *finger joint* (MPa)

rm = resistência média das amostras maciças (MPa)

3.1.3. Deslocamento e deformação das amostras

Anteriormente aos ensaios, todos os corpos de prova de teste mecânico (maciço – tração e compressão paralelas - e com emenda *finger joint* – tração paralela) foram pulverizados com tinta preta sobre uma base branca (Figura 17) para posterior captura de imagens por vídeo para utilização em *software* de análise e correlação de dados. Os ensaios foram filmados para posterior análise da deformação sofrida pelos corpos de prova. Foram utilizadas duas câmeras

com imagens obtidas em 4k com 30 frames por segundo, uma para a largura das amostras e a outra para a espessura.



FIGURA 17 - AMOSTRAS DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS PULVERIZADA COM TINTA PRETA.

FONTE: O autor (2022).

Os vídeos foram analisados, um a um, com o uso do *software Gom Correlate*®, que os divide em imagens (30 para cada segundo de filmagem). A partir de referências de comprimento fornecidas, verifica o deslocamento das amostras ao longo dos ensaios (Figura 18). Foram utilizadas três retas para cada amostra, suficiente para avaliar seu comportamento. Todas as retas tinham os pontos inferior e superior considerando o início e fim da seção reduzida. Com isso, o programa informa os valores do deslocamento em milímetros (mm) e apresenta os pontos de início da fratura. Com todas as imagens analisadas individualmente para cada amostra, o *software* fornece os valores de deslocamento em cada imagem, que pode ser verificada em microssegundos.

FIGURA 18 - VALORES DE DESLOCAMENTO LONGITUDINAL (Y) EM AMOSTRA DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS



FONTE: O autor (2022). Onde: Nominal: comprimento inicial de cada reta. Actual: comprimento final de cada reta. Dev: variação do deslocamento de cada reta.

Fornecida uma referência de dimensão baseada na régua, foram definidas a escala e a superfície da amostra a ser analisada. A partir disso foram determinadas distâncias (retas), que sofrem deslocamento ao longo do ensaio, para obtenção da deformação. Para tal, foram utilizadas 3 retas em cada amostra, quantidade representativa para o cálculo da deformação. A Figura 21 mostra o deslocamento destas distâncias no sentido longitudinal (y), e cada reta apresenta o quanto deslocou até no limite anterior à ruptura da amostra.

A deformação foi calculada (equação 10) pela razão entre o alongamento das peças e seu respectivo comprimento inicial:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{10}$$

Onde:

E = deformação (adimensional)

 Δl = alongamento (comprimento final) (mm)

 $l_0 =$ comprimento inicial (mm)

Os valores de deslocamento utilizados para cálculo da deformação foram obtidos no *software Gom Correlate*®, conforme exposto na Figura 18.

Finalmente, foram calculados a média e o Coeficiente de Variação (CV) para as propriedades físicas e mecânicas avaliadas. O R² e a equação da curva apresentados nos gráficos foram obtidos diretamente da linha de tendência do gráfico no software Excel. O R² que melhor representou os dados, com valor o mais próximo de 1, está relacionado à linha de tendência que com equação polinomial que melhor se ajustou aos pontos de dados.

3.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A distribuição de tensões ao longo de toda a emenda *finger joint* foi avaliada com o uso do *software Abaqus*® em análise numérica em duas dimensões (2D). Para o material foi assumido comportamento elástico-linear, onde as duas peças que compõem a emenda interagem ao longo dos entalhes por contato. Para o comportamento mecânico tangencial da interface entre dois elementos foi considerado um coeficiente de fricção igual a zero, tanto para cinemático quanto para estático, e comportamento normal em que não há interpenetração dos elementos a partir da superfície.

A subdivisão do elemento na área da emenda (Figura 19) consistiu em 21.035 elementos. A malha foi refinada com aresta global de tamanho 1 mm, o comprimento das emendas de tamanho 0,5 mm, e na ponta e base do *finger joint* de tamanho 0,08 mm. No caso, foi empregado elementos triangulares de segunda ordem de seis nós (CPS6M).

FIGURA 19 - MALHA GERADA COM ELEMENTOS TRIANGULARES CPS6M. AS ARESTAS NO COMPRIMENTO DOS ENTALHES FORAM DESTACADAS PARA MELHOR COMPREENSÃO DAS PEÇAS MONTADAS.



FONTE: O autor (2022).

Para a simulação, a madeira foi considerada como transversalmente isotrópica. Os parâmetros constitutivos, calculados a partir dos resultados mecânicos obtidos neste trabalho, como Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson estão definidos na Tabela 4.

E ₁ (MPa)	$E_2 = E_3$ (MPa)	$G_{12} = G_{13}$ (MPa)	G ₂₃ (MPa)	$v_{31} = v_{21}$	$v_{12} = v_{13}$	$v_{23} = v_{32}$
5.529,92	368,66	2.118,74	113,67	0,033	0,305	0,379
EONITE: O	(2022)					

TABELA 4. VALORES DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS INSERIDOS NO ABAQUS®.

FONTE: O autor (2022).

 E_1 , E_2 , E_3 são o Módulo de Elasticidade nas direções longitudinal, transversal e radial; G_{12} , G_{13} e G_{23} são o Módulo de Elasticidade Transversal nos planos longitudinal, transversal e radial; v_{12} , v_{13} , v_{23} , v_{21} , v_{31} , v_{32} são os coeficientes de Poisson.

Na base da peça inferior, após a montagem da emenda, foram definidas restrições de deslocamento em x, y e z, bem como de rotação. Esta condição é chamada engaste (Figura 20).



FIGURA 20 - CONDIÇÕES DE CONTORNO APLICADAS: ENGASTE E VELOCIDADE.

FONTE: O autor (2022).

Outra condição de contorno aplicada foi velocidade de -1,2 m/s no eixo y, ao longo da peça superior (Figura 20), simulando a pressão de colagem. O valor negativo reflete a direção, de cima para baixo. Nos eixos x e z o valor foi zero, pois o deslocamento em x e z não era desejado.

Após o término das especificações, o modelo foi submetido à análise dinâmica explicita, em que a solução num determinado instante é dependente da solução no instante anterior.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas, muito importantes por estarem associadas às demais características, são apresentadas na Tabela 5. O resultado mais relevante, de densidade básica, apontou que as amostras tinham, em média, 0,497 g/cm³, indicando ser uma madeira de baixa densidade conforme Melo *et al.* (1990); Vale *et al.* (2002, 2005); Coradin *et al.* (2010); e Silveira *et al.* (2013).

Propriedade física	Valor médio
Densidade básica (g/cm ³)	0,497 (8,52%) *
Densidade aparente em 12% (g/cm ³)	0,625 (10,02%)
Densidade aparente saturada (g/cm ³)	0,881 (5,12%)
Densidade aparente 0% (g/cm ³)	0,517 (9,11%)
Contração tangencial (%)	6,223
Contração radial (%)	4,963
Coeficiente de retratibilidade volumétrico (%/%)	0,173
Anisotropia de contração	1,254
Anisotropia de inchamento	1,271

TABELA 5 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO MATERIAL.

FONTE: O autor (2022).

Subscrito *: Valores entre parêntesis corresponde ao Coeficiente de variação.

Quanto à anisotropia, embora o fator ideal seja igual a 1, isto não pode ser observado na madeira devido às suas características de ortotropia e anisotropia, pois há alteração nas dimensões conforme alteração da umidade (até o PSF). Segundo Moreschi (2012), quanto mais próximo de 1, menores as alterações das dimensões ou nos seus diferentes sentidos anatômicos. Apesar disto, a madeira usada nesta pesquisa pode ser considerada excelente quanto à anisotropia, tanto de contração (1,25), quanto de inchamento (1,27), refletindo em menos problemas de empenamentos, torções, e outros defeitos relativos à perda ou ganho de umidade. Vale ressaltar que este ótimo resultado foi obtido sem problemas com histerese, já que a secagem a 0% de umidade foi feita após as medições a 12% e em saturação. Em contrapartida, nem todas as amostras estavam perfeitamente orientadas quanto aos planos ortogonais, conforme mostrado na Figura 21. FIGURA 21 - DIREÇÃO DESIGUAL DOS PLANOS ORTOGONAIS. AMOSTRAS DE PROPRIEDADES FÍSICAS.



Por fim, os resultados das propriedades físicas obtidos nesta pesquisa indicam estabilidade dimensional, sendo uma madeira pouco propícia a problemas de secagem como torções e empenamentos. Ainda, a baixa densidade observada facilita processos de colagem, uma vez que o adesivo tem mais facilidade de adentrar na parede celular.

4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A Tabela 6 apresenta os resultados médios dos ensaios mecânicos realizados.

TABELA 6 -	RESULTADOS	DAS	PROPRIEDADES	MECÂNICAS	AVALIADAS	DA	MADEIRA	DE
Eucalyptus gra	ndis COM E SEM	1 EME	ENDAS FINGER JO	DINT.				

Ensaio	Média (MPa)	
Módulo de Elasticidade dinâmico (Et) – madeira	11.941,35 (14,79 %)	
sólida – stress wave timer		
Módulo de Elasticidade (Ec) – madeira sólida –	12 ((4 24	
ensaio à compressão paralela às fibras	12.004,24 (10,67 %)	
Resistência à compressão paralela às fibras	53,06 _(7,15 %) *	
Resistência à tração paralela às fibras – madeira	118 50	
sólida	118,30 (29,55%)	
Resistência à tração paralela às fibras – finger joint	36,84 (24,27 %)	
Módulo de elasticidade (Et) – finger joint – stress	10 254 25	
wave timer	10.334,33 (13,51 %)	

FONTE: O autor (2022).

Onde: Et: Módulo de elasticidade à tração paralela; Ec: Módulo de elasticidade à compressão paralela. Subscrito: coeficiente de variação em porcentagem.

* O valor característico calculado foi de 46,84 MPa.

O Módulo de Elasticidade obtido a partir de ondas de impacto (*stress wave timer*) para a madeira maciça foi de 11.941,35 MPa, e para as amostras com *finger joint*, o E foi de 10.354,35 MPa. Já para o E determinado a partir do ensaio de compressão paralela às fibras, o valor foi de 12.664,24 MPa. Ainda que o Módulo de Elasticidade não forneça informações reais sobre o comportamento do material, pode-se inferir que, na medida em que o E aumenta, também aumentam a resistência e a qualidade da madeira para a construção civil, e menor será sua deformabilidade (MORESCHI, 2012). O E é utilizado na classificação das lâminas para a composição nas vigas de MLC. Segundo Bodig e Jayne (1982), este procedimento garantirá melhor desempenho das referidas vigas, devendo-se levar em conta a resistência mecânica e os defeitos (nós, rachaduras, entre outros), posicionando as melhores lâminas nos terços superior e inferior, e as de menor qualidade no terço interno (TEREZO e SZÜCS, 2010). Para efeitos de comparação, a norma brasileira de estruturas em madeira NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta valor médio de 12.813 MPa de módulo de elasticidade para o *E. grandis* com densidade de 0,640 g/cm³. Ainda, Vivian *et al.* (2012) obtiveram módulo de elasticidade médio de 10.173,14 MPa para amostras de *E. grandis* de densidade média de 0,530 g/cm³.

Diversas pesquisas encontraram boas correlações para o módulo de elasticidade em ensaios destrutivos e a técnica de ondas de tensão, entre eles, Sandoz (1989), Falk *et al.* (1990), Vivian *et al.* (2012), e Cademartori *et al.* (2014), demonstrando a confiabilidade do método *stress wave timer*.

Para as amostras maciças de tração paralela, as análises por Pearson mostraram uma correlação de 0,32 entre o E dinâmico e o E estático. Este coeficiente é considerado baixo e indica uma fraca relação entre os dois métodos de obtenção dos módulos de elasticidade. Este resultado, no entanto, está vinculado a outros fatores inerentes ao material e ao ensaio, como explorado adiante.

Quanto aos resultados de resistência, a média de tensão máxima à compressão paralela às fibras foi de 53,06 MPa com deformação média de 0,0119 mm. Considerando o uso estrutural, a resistência à compressão paralela demonstrou que a madeira pode ser classificada como C40 segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), haja visto que o valor característico calculado foi de 46,84 MPa.

Para esta propriedade, outros pesquisadores encontraram resultados semelhantes, tais como: 52,25 MPa (HEIN *et al.*, 2009); 51,17 MPa (HEIN e LIMA, 2012); 48,94 MPa (SANTOS *et al.*, 2004); 40,1 MPa (LAHR *et al.*, 2018); 40,3 MPa (ABNT, 1997) e 54,1 MPa (IEJAVS *et al.*, 2021). Apesar de cada peça apresentar desempenho específico à sua estrutura

química, anatômica e física, pode-se considerar que a semelhança de resultados obtidos por diferentes trabalhos, realizados com uma infinidade de variações e fatores não controláveis e desconhecidos, pressupõe um comportamento padrão para a espécie em questão.

O Gráfico 3 mostra a relação entre a tensão de compressão (MPa) e a densidade aparente (g/cm³) do ensaio (12% de umidade), com $R^2 = 0,978$ da linha de tendência à 2^a ordem, evidenciando que peças de maior densidade apresentaram maior resistência às solicitações.



GRÁFICO 3 - GRÁFICO TENSÃO X DENSIDADE DAS AMOSTRAS DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.

Isso ocorre porque, com a parede celular mais espessa, maior a quantidade de lignina, celulose e hemicelulose, e menos espaços vazios, necessitando maior força para a deformação da amostra.

A resistência média à tração paralela às fibras foi 118,50 MPa, indicando um comportamento excelente para a madeira estudada, sobretudo quando destacada a redução da seção central e a complexidade do ensaio. Apesar de a resistência à tração paralela às fibras poder variar de 45 a 120 MPa (GREEN, 2001), este resultado foi maior que os encontrados na literatura, como em Lahr *et al.* (2018), com 70,3 MPa, Lobão *et al.* (2004) com 75,3 MPa, e na Norma Brasileira de Estruturas em Madeira (NBR 7190), com 70,2 MPa.

FONTE: O autor (2022).

No caso do gráfico Tensão x densidade aparente (Gráfico 4) para o ensaio de tração paralela, não se observa a mesma relação que nos testes de compressão paralela anteriormente mencionados, não havendo tendência evidente, com um R^2 de 0,398 na 6^a ordem.



GRÁFICO 4 - GRÁFICO DE TENSÃO X DENSIDADE DAS AMOSTRAS MACIÇAS DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS.

Este comportamento pode estar relacionado com a inclinação das fibrilas na parede celular, responsável pela resistência, que é diferente em cada amostra, uma vez que sua posição no tronco da árvore varia, assim como a configuração do corte e usinagem, mesmo que todas elas tenham sido serradas no sentido longitudinal. Estes aspectos estão relacionados, também, com a complexidade do ensaio, no qual a ruptura ocorre por deslizamento entre as células ou por ruptura das paredes celulares.

Devido à pequena inclinação das fibrilas, a camada S2 é provida de resistência à tração, enquanto na S1 as fibrilas bem inclinadas conferem resistência à compressão, ambas ao longo do eixo da célula (FENGEL e WEGENER, 1989). Acredita-se, portanto, que pequenas variações no ângulo de direção de corte de cada corpo de prova tenham interferido na resistência, mesmo em amostras de densidade um pouco maior. Observa-se, ainda, que a posição da amostra ao longo do tronco refletirá na quantidade e orientação dos anéis de

FONTE: O autor (2022).

crescimento, que também influenciam o desempenho de cada corpo de prova e a maneira como ocorre a ruptura.

Jeong e Park (2016), avaliando a ortotropia da madeira em 4 espécies diferentes, testaram 6 orientações de corte em amostras de tração paralela às fibras – longitudinal, radial, tangencial, longitudinal-tangencial, radial-tangencial e tangencial-radial – e consideraram que a resistência radial foi superior à resistência tangencial, evidenciando as variações que ocorrem de acordo com a direção de corte, as quais são características da ortotropia.

Para as amostras *finger joint* avaliadas pelo teste de tração paralela às fibras, o resultado médio de resistência foi de 36,84 MPa. Avaliando três diferentes locais de produção de emendas *finger joint* em madeira de *E. grandis*, Stüpp (2016) obteve médias de 24,48 MPa; 67,55 MPa, e 33,01 MPa para o adesivo resorcina fenol formaldeído em ensaios de tração paralela às fibras. Também, Serrano (2009) encontrou 50,04 MPa de resistência média dos corpos de prova com juntas do tipo *finger joint*.

Considerando os resultados verificados por estes autores, assim como os desta pesquisa, percebe-se que não há um padrão entre eles. Este comportamento é característico de produtos em madeira, em que há variação na densidade devido à idade, condições de sítio, quantidade e espessura dos anéis de crescimento, assim como aos fatores relacionados ao processamento da madeira e produção das emendas *finger joint*, tais quais a orientação de corte, a geometria dos entalhes, o adesivo utilizado, a colagem e a pressão de colagem.

Quanto ao modo de ruptura, 15 amostras (60%) tiveram a maior parte do descolamento no adesivo (modo 1). 3 amostras romperam com mais de 70% na madeira (modo 2), 2 apresentaram ruptura no meio dos entalhes (modo 3), 2 romperam na base dos entalhes (modo 4), e 3 tiveram início de ruptura nos entalhes, mas com propagação da falha para fora das emendas (modo 5). Nenhuma amostra rompeu fora da área de união, conforme modo de ruptura 6. Duas amostras apresentaram cisalhamento entre as fibras ao longo da amostra (longitudinal), não havendo modo de ruptura compatível com estes casos, pela norma ASTM D 4688 (2021). As amostras 1 e 2 apresentaram características de dois tipos de ruptura, não sendo possível considerar apenas um deles. Este resultado, grande parte das amostras apresentarem descolamento, contraria a afirmação de Walford (2000) de que emendas *finger joint* feitas de madeira de baixa densidade tenderiam a falhar na madeira. Porém, o comportamento observado na maioria das amostras indica possíveis problemas na colagem, como linha de cola faminta e baixa qualidade de adesão, gerado por madeiras de baixa densidade (IWAKIRI, 2005) e/ou com teor de umidade baixo ou, ainda, por baixa viscosidade do adesivo, o que pode ser solucionado controlando os fatores supramencionados. Assim como no ensaio das amostras maciças de tração paralela, o gráfico tensão x densidade das amostras *finger joint* (Gráfico 5) também não apresentou relação entre as propriedades, com a linha de tendência de polinômio à 6^a ordem e $R^2 = 0,093$.



GRÁFICO 5 - GRÁFICO DE TENSÃO X DENSIDADE DAS AMOSTRAS *FINGER JOINT* DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS.

FONTE: O autor (2022).

A despeito de todos os fatores inerentes ao processo de produção de emendas *finger joint*, atribui-se, a esse comportamento, contexto semelhante ao anteriormente explanado. Esta hipótese é considerada visto que no caso do modo de ruptura 1, o mais frequente, houve grande variação da tensão máxima, demonstrando que, apesar de ter rompido na linha de cola, a amostra suportou também grandes tensões, inclusive a maior delas, de 57,66 MPa.

Ayarkwa *et al.* (2000), observaram que a presença de emendas *finger joint* não pareceu ter muita influência no módulo de elasticidade em tração. De maneira semelhante, Vassiliou *et al.* (2005, 2009), Ayrkawa *et al.* (2000) e Gong *et al.* (2009) descobriram que a geometria dos entalhes não influenciou significativamente o módulo de elasticidade.

A dispersão do gráfico 6 mostra que não houve uma interação relevante entre a Tensão e o Módulo de Elasticidade.



GRÁFICO 6 - GRÁFICO TENSÃO X MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS AMOSTRAS FINGER JOINT.

FONTE: O autor (2022).

O baixo R² (0,5709) da linha de tendência com polinômio à 6^a ordem confirma essa observação, em que não há uma relação explícita entre eles. Ainda, a maioria dos dados se localizou entre 9.000 e 11.000 MPa. Gong *et al.* (2009), ao avaliarem as propriedades mecânicas e a qualidade de ligação da madeira serrada com *finger joint*, não apontaram nenhuma diferença significativa no módulo de elasticidade médio e resistência à tração. Diante disto, acredita-se que as emendas *finger joint* não tenham efeitos expressivos sobre o Módulo de Elasticidade.

4.2.1. Grau de enfraquecimento e perda de resistência

O grau de enfraquecimento calculado foi de 17% e, portanto, esperava-se resistências aproximadas de 98 MPa. Contudo, a média de perda de resistência foi de 68,91%, ou seja, a eficiência da emenda *finger joint* foi de 31,09%, com perdas máximas de 82,33% e mínima de 51,34%.

Diversos fatores podem ter interferido neste comportamento, haja visto que a resistência de emendas *finger joint* podem alcançar bons resultados em relação à resistência da

madeira maciça. Não apenas a densidade é relevante no desempenho das emendas, mas diversos são os fatores que interferem na qualidade destas juntas, sendo a espécie, a geometria do entalhe, o adesivo utilizado, e a pressão de colagem, os mais importantes. Pesquisadores têm mostrado o quão críticos são estes aspectos, entre eles, Ayarkwa *et al.* (2000), Bustos *et al.* (2003, 2011), Özçifiçi e Yapici (2008), Habipi e Ajdinaj (2013), Franke *et al.* (2014), Tran *et al.* (2014), Habipi *et al.* (2016).

Destas variáveis, a pressão de colagem, além de ser um fator limitante para a boa qualidade da emenda, também é determinante na perda de resistência pela concentração e distribuição de tensões ao longo de toda a junta. A pressão de colagem ideal é a que permite a formação de uma fina camada de adesivo ao longo do entalhe sem a formação de tensões na base causadas pelas pontas, bem como o travamento lateral devido à ponta ser ligeiramente mais larga que a base. Este cenário não é possível devido aos diversos aspectos já citados, como densidade e geometria da emenda. Pode-se, porém, otimizar o processo de produção destas emendas de forma a minimizar os efeitos da pressão de colagem a partir da verificação da concentração e distribuição das tensões. Para uma análise acurada destas tensões foi desenvolvido um modelo de elementos finitos.

4.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A concentração de tensões originada no processo produtivo das emendas *finger joint*, bem como sua distribuição nos pontos de encaixe (base e ponta) dos entalhes, estão representadas nas Figuras 22 e 23. Estas imagens mostram as tensões nos sentidos paralelo aos entalhes (S22 – Figura 22) e perpendicular (S11 – Figura 23) aos entalhes demonstrando a influência da pressão de colagem sobre a distribuição das tensões.



FIGURA 22 - TENSÕES GERADAS PELA PRESSÃO DE COLAGEM NO SENTIDO PARALELO (S22).



Onde: S – tensão; 22 – y (sentido longitudinal). Valores negativos indicam tensões de compressão, valores positivos indicam tensões de tração. Unidades em MPa.





FONTE: O autor (2022).

Onde: S – tensão; 11 - x (sentido transversal). Valores negativos indicam tensões de compressão, valores positivos indicam tensões de tração. Unidades em MPa.

A maior largura da ponta dos entalhes resulta em maiores concentrações de tensões na base da emenda devido à pressão lateral provocada pela diferença entre as duas dimensões. Este cenário também foi observado em outras pesquisas, como de Franke *et al.* (2014), Qu e Fan (1988), Pellicane (1994) e Jauslin *et al.* (1995). Também, Milner e Yeoh (1991) afirmam que, devido à concentração de tensões, as pontas dos entalhes são o fator que mais afeta o desempenho das junções. Por outro lado, a espessura da ponta dos entalhes está intimamente relacionada aos demais fatores da geometria, a começar pelo ângulo de inclinação, e aos demais aspectos inerentes ao processo produtivo, como a pressão de colagem.

Na medida em que a pressão de colagem vai sendo aplicada, percebe-se que os elementos circundantes absorvem as tensões liberadas (Figuras 24 e 25), posteriormente propagando-as, posteriormente, para outros elementos.

FIGURA 24 - EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NAS PONTAS E BASE DOS ENTALHES AO LONGO DA APLICAÇÃO DE PRESSÃO.



Etapa 3/20 FONTE: O autor (2022). Tensões no sentido longitudinal – paralelo (eixo y).

Etapa 4/20


FIGURA 25 - EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NAS PONTAS E BASE DOS ENTALHES AO LONGO DA APLICAÇÃO DE PRESSÃO.

Etapa 11/20 FONTE: O autor (2022). Tensões no sentido tangencial (eixo x). Etapas 9, 10, 11 e 12, de 20.

É possível perceber como as tensões são dissipadas, sendo as tonalidades mais avermelhadas referentes às tensões de tração e as mais azuladas relacionadas à tensão de compressão. Na medida em que a pressão é aplicada, as tensões, principalmente de tração, aumentam e se espalham ao longo dos entalhes.

Renaudin (1997) propôs que a falha de um elemento resulta na redistribuição de tensões para elementos vizinhos, seguindo regras explícitas que foram configuradas usando análises de elementos finitos da distribuição de tensões nas proximidades das trincas resultantes da fissura.

5 CONCLUSÕES

Neste projeto foram caracterizadas algumas propriedades tecnológicas da madeira da espécie *Eucalyptus grandis* e de emendas *finger joint* para fins estruturais, e avaliada a distribuição de tensões ao longo das emendas por entalhes múltiplos por meio do método dos elementos finitos.

Os resultados experimentais obtidos das propriedades físicas indicaram que a madeira utilizada, de densidade 0,4971 g/cm³, tem ótimo desempenho anisotrópico, com valor próximo de 1.2.

Ainda, o valor característico calculado a partir da resistência à compressão paralela às fibras, de 46,84 MPa, sugere que o material pode ser classificado na Classe C40 de resistência, consoante com a NBR 7190 (ABNT, 1997). O resultado de solicitação à tração paralela às fibras (118,50 MPa) revelou uma ótima capacidade de resistência do material a este tipo de esforço.

As amostras *finger joint*, com média de resistência de 36,84 MPa, tiveram perda de resistência de 68,91%, ou seja, eficiência de 31,09%. Com 60% das amostras ensaiadas apresentando modo de ruptura 1, relativo ao descolamento do adesivo, acredita-se que a reduzida capacidade de suportar maiores tensões de tração paralela esteja relacionado a problemas na colagem. Entretanto, não foi possível identificar o fator que mais contribuiu para este resultado.

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas combinadas indicam uma madeira de baixa anisotropia e com baixa densidade, sendo ideal para aplicação em estruturas de madeira pela fácil colagem, estabilidade dimensional e excelente relação resistência/peso.

A técnica DIC (*digital image correlation*) se mostrou uma ferramenta eficiente para avaliar a taxa de deformação em cada etapa do ensaio.

Finalmente, a simulação numérica foi capaz de analisar um modelo de elementos finitos de maneira adequada, fornecendo informações de concentração e distribuição de tensões ao longo das emendas *finger joint*. Os resultados demonstraram como as tensões se difundiram nas emendas na medida em que a pressão foi aplicada, com maior concentração na base dos entalhes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2013. Em revisão.

AICHER, S.; CHRISTIAN, Z.; DILL-LANGER, G. Hardwood glulams-emerging timber products of superior mechanical properties. *In*: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2014, Québec. *Proceedings...* Québec, 2014.

ALBINO, V. C. do S. Estudo do comportamento da colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído. 2009. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Lavras, 2010.

ÁLVAREZ, J.; ALLEN, H. L.; ALBAUGH, T. J.; STAPE, J. L.; BULLOCK, B. P.; SONG, C. Factors influencing the growth of *Radiata pine* plantations in Chile. Forestry: An International Journal of Forest Research, v. 86, n. 1, p. 13–26, 2013.

AMER, M.; KABOUCHI, B.; RAHOUTI, M.; FAMIRI, A.; FIDAH, A.; EL ALAMI, S. Mechanical Properties of Clonal *Eucalyptus* Wood. **International Journal of Thermophysics**, v. 42, n. 20, 2021.

ARAUJO, M. J. de; LEE, D. J.; TAMBARUSSI, E. V.; PAULA, R. C. de; SILVA, P. Initial productivity and genetic parameters of three *Corymbia* species in Brazil: designing a breeding strategy. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 51, n. 1, p. 25-30, 2020.

ASSIS, T. F. de. Production and use of *Eucalyptus* hybrids for industrial purposes. *In*: HYBRID BREEDING AND GENETICS OF FOREST TREES: QFRI/CRC-SPF SYMPOSIUM, 2000, Australia. *Proceedings*... Queensland, 2000. p. 63-74.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143**: Standard Test Method for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken, PA. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7469**: Standard Test Method for End-Joints in Structural Wood Products. West Conshohocken, PA. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2395**: Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials. West Conshohocken, PA. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4761**: Standard Test Method for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Based Structural Materials. West Conshohocken, PA. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4688**: Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber, West Conshohocken, PA. 2021.

AYARKWA, J.; HIRASHIMA, Y.; SASAKI, Y.; YAMASAKI, M. Influence of finger-joint geometry and end pressure on tensile properties of three finger-jointed Tropical African Hardwoods. **The Southern African Forestry Journal**. v. 188, n. 1, p. 37-49. 2000.

BÁDER, M.; NÉMETH, R. The effect of the rate of longitudinal compression on selected wood properties. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, Sopron, v. 14, n. 1, p. 83-92. 2018.

BAL, B. C. Some technological properties of laminated veneer lumber produced with fastgrowing Poplar and Eucalyptus. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 18, n. 3, p. 413–424, 2016.

BAMBER, R. K.; FLOYD, A. G.; HUMPHREYS, F. R. Wood Properties of Flooded Gum. Australian Forestry. v. 1, n. 33, p. 3 - 12. 1969.

BARREIRO, S.; TOMÉ, M. SIMPLOT: Simulating the impacts of fire severity on sustainability of Eucalyptus forests in Portugal. **Ecological Indicators**. v. 11, n. 1, p. 36–45. 2011.

BARKAS, W. W. The anisotropic elastic properties of wood. *In*: CONFERENCE BRITISH RHEOLOGIST CLUB, 1. *Proceedings*... 1946.

BAUHUS, J.; VAN DER MEER, P. J.; KANNINEN, M. Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests. Londres: Earthscan, 2010.

BENTLEY, R. On the characters, properties and uses of *Eucalyptus globulus* and other species of *Eucalyptus*. Whitefish: Kessinger Publishing, 1874.

BLANKENHORN, P. R. Wood: Sawn materials. *In*: JÜRGEN BUSCHOW, K. H.; CAHN, R. W.; FLEMINGS, M. C.; ILSCHNER, B.; KRAMER, E. J.; MAHAJAN, S.; VEYSSIÈRE, P. (Ed.). **Encyclopedia of materials: Science and Technology**. Elsevier, 2001. p. 9722-9732.

BONDUELLE, G. M.; IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G.; ROCHA, V. Y. Análise da massa específica e da retratibilidade da madeira de *Tectona grandis* nos sentidos axial e radial do tronco. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 4, p. 671-680, 2015.

BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. Forest Ecology and Management, v. 301, p. 28–34, 2013.

BORRALHO, N. M. G.; COTTERILL, P. P. Genetic improvement of *Eucalyptus globulus* for pulp production. *In*: PEREIRA, J. S.; PEREIRA, H. *Eucalyptus* for biomass production. Commission of the European Communities, 1994. p. 85–99.

BOURREAU, D.; AIMENE, Y.; BEAUCHÊNE, J.; THIBAUT, B. Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. **European Journal of Wood and Wood Products**. v. 71, p. 653-662, 2013.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. Mechanics of wood composites. New York: Van Nostrand Reinhold Co. Inc., 1982.

BOYD, S. W.; DULIEU-BARTON, J. M.; RUMSEY, L. Stress analysis of finger joints in pultruded GRP material. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 26, n.7. p. 498-510, 2006.

BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden ao nível do DAP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.5, p.81-90, 1972.

BROCKERHOFF, E. G.; JACTEL, H.; PARROTTA, J. A.; FERRAZ, S. F. B. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. **Forest Ecology and Management**, v. 301, n. 1, p. 43–50, 2013.

BURK, A. G.; BENDER, D. A. Simulating *finger joint* performance based on localized constituent lumber properties. **Forest Products Journal**, v. 39, n. 3, p. 45-50, 1989.

BUSTOS, C.; BEAUREGARD, R.; MOHAMMAD, M.; HERNÁNDEZ, R. E. Structural performance of finger-jointed black spruce lumber with different joint configurations. **Forest Products Journal**, v. 53, n. 9, p. 72-76, 2003a.

BUSTOS, C.; MOHAMMAD, M.; HERNÁNDEZ, R. E.; BEAUREGARD, R. Effects of curing time and end pressure on the tensile strength of finger-joined black sprucelumber. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 53, n. 11, p. 1-5, 2003b.

BUSTOS, C.; HERNÁNDEZ, R. E.; BEAUREGARD, R.; MOHAMMAD, M. Effects of endpressure on the finger-joint quality of black spruce lumber: A microscopic analysis. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 13, n. 3, p. 319-328, 2011. DOI:10.4067/s0718-221x2011000300007

BYRNE, M. Phylogeny, diversity and evolution of eucalypts. *In*: SHARMA, A. K.; SHARMA, A. (Ed.) **Plant Genome: Biodiversity and Evolution**, v. 1, parte E: Phanerogams-Angiosperm, 2008. p. 303-346.

CABRAL, C. P.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; PIMENTA, A. S. Properties of particleboards manufactured with mixed particles from *Eucalyptus spp.* and *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 897–905, 2007.

CADEMARTORI, P. H. G. de; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R. Prediction of the modulus of elasticity of *Eucalyptus grandis* through two nondestructive techniques. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 369–375, 2014.

CASTRO, G.; PAGANINI, F. Poplar-Eucalyptus glued laminated timber. *In*: INDUSTRIAL END-USES OF FAST-GROWN SPECIES: EUROWOOD TECHNICAL WORKSHOP PROCEEDINGS, 1999, Florence. *Proceedings...* Florence, 1999. p. 147-166.

CASTRO, G.; PAGANINI, F. Mixed glued laminated timber of poplar and *Eucalyptus grandis* clones. **HolzalsRoh-und Werkstoff**, v. 61, n. 4, p. 291–298, 2003.

CHEN, J.; XIONG, H.; WANG, Z.; YANG, L. Mechanical properties of a eucalyptus-based oriented oblique strand lumber for structural applications. **Journal of Renewable Materials**, Henderson, v. 7, n. 11, p. 1147–1164, 2019.

CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; VALARELLI, I. D.; BATTISTELLE, R. A. G.; BRANCO, L. A. M. N.; CHAHUD, E.; PANZERA, T. H. Evaluation of the tensile modulus of elasticity in parallel direction to the grain for *Eucalyptus grandis* Wood Specie. Advanced Materials Research, v. 1088, p. 599-602, 2015.

CLARK, A. I. I. I.; SAUCIER, J. R. Influence of plant density, intensive culture, geographic location, and species on juvenile wood formation in Southern Pine. **Georgia Forest Research Paper**, v. 85, p. 1-13, 1991.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and applications of finite element analysis**. 4 ed. Madison: John Wiley and Sons, 1989.

COOPER, E. Forest culture and Eucalyptus trees. San Francisco: Cubery and Company, 1876.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; PASTORE, T. C. M.; CHRISTO, A. G. Madeiras comerciais do Brasil: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos. Brasília, 2020. Disponível em: <u>https://lpf.florestal.gov.br/en-us/chave-interativa-de-identificação</u>. Acesso em setembro 2021.

DEL MENEZZI, C. H. S. Utilização de um método combinado de desdobro e secagem para a produção de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. 1999. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Ciência e Tecnologia da Madeira) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

DINWOODIE, J. M. Timber: a review of the structure-mechanical property relationship. **Journal of Microscopy**, v. 104, n. 1, p 3–32, 1975.

DUGMORE, M.; NOCETTI, M.; BUNETTI, M.; NAGHIZADEH, Z.; WESSELS, C. B. Bonding quality of cross-laminated timber: Evaluation of test methods on *Eucalyptus grandis* panels. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 217–227, 2019.

ELZAKI, O. T.; KHIDER, T. O. Physical and Mechanical Properties of *Pinus radiata* from Jebel Marra Western Sudan. Journal of Forest Products and Industries, v. 2, n. 3, p. 53–57, 2013.

ERICKSON, E. C. O. Strength Tests of Spliced Studs. Forest Products Laboratory. 1941.

EUROPEAN STANDARD. EN 385: Finger jointed structural timber – Performance requirements and minimum production requirements. Bruxelas, 2001.

FALK, R. H.; PATTON-MALLORY, M.; MCDONALD, K. A. Nondestructive testing of wood products and structures: state-of-the-art and research needs. **Forest Products Laboratory**, p. 137-147, 1990.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood - Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. 2 Ed. Berlim: Walter de Gruyter, 1989.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. Ambiente Construído, v. 9, n. 4, 2009.

FISETTE, P. R.; RICE, W.W. An analysis of structural finger-joints made from two northeastern species. Forest Products Journal, v. 38, n. 9, p. 40-44, 1988.

FOSSETTI, M.; MINAFO, G.; PAPIA, M. Flexural behavior of glulam timber beams reinforced with FRP cords. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 54-64, 2015.

FRANGI, A; BERTOCCHI, M; CLAUß S, *et al.* Mechanical behavior of *finger joints* at elevated temperatures. **Wood Science and Technology**, v. 46, p. 793-812, 2012.

FRANKE, B.; SCHUSSER, A.; MÜLLER, A. Analysis of finger joints from beech wood. *In*: World conference on timber engineering – WCTE, 2014, Québec. *Proceedings*... Québec, 2014.

FRANKOVSKI, P.; VIRGALA, I.; HUDAK, P.; KOSTKA, J. The use of Digital Image Correlation in a strain analysis. **International Journal of Applied Mechanics and Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1283-1292, 2013.

FREISCHMIDT, G.; BLAKEMORE, P. Potential applications of the native hardwood resource available to VicForests as wood composite products. CSIRO Materials Science and Engineering. 2009. Relatório Técnico.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials - Bond formation and performance. *In*: **Wood Handbook**. Madison: USDA Forest Service, 2010. p. 10.1-10.24.

GINDL, W.; MÜLLER, U. Shear strain distribution in PRF and PUR bonded 3 plywood sheets by means of electronic laser speckle interferometry. **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 5, p. 351-357, 2005.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. *In*: **Wood Handbook**. Madison: USDA Forest Service, 2021. p. 4.1-4.22.

GONÇALEZ, J. C.; BREDA, L. C.; BARROS, J. F. M. MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F. C. *et al.* Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Revista Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

GONG, M.; DELAHUNTY, S.; CHUI, Y. H. Development of material-efficient finger-joint profile for structural finger-joined lumber. **Wood Science and Technology**, 2009.

GONG, M.; DELAHUNTY, S.; CHUI, Y.H. Influence of number of finger joints per stud on mechanical performance of wood shear walls. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 335-339, 2014.

GOUVEIA, F. N.; SANTANA, M. A. E.; SOUZA, M. R. The use of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden and *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake for the production of non-oriented and oriented strand board. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 7–12, 2000.

GREEN, D. W. Wood: Strength and Stiffness. *In*: Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2001. p. 9732 - 9736.

GROOM, L. H.; LEICHTI, R. J. Effect of Adhesive Stiffness and Thickness on Stress Distributions in Structural Finger Joints. Adhesion, v. 44, p. 69-83, 1994.

HABIPI, B.; AJDINAJ, D. Study of Five Joint Slope Angels on Bending Strength of Poplar Wood (*Populus alba* 1.) Finger Joint Connection. International Journal of Current Engineering and Technology, v. 3, n 5, 2013.

HABIPI, B.; ÇOTA, H.; KODRA, A. The effect of fingers tips position on tensile strength of finger joint connection. Journal of International Academic Research for Multidisciplinary, v. 4, n. 1, 2016.

HANS, A. S.; BURLEY, J.; WILLIAMSON, P. Wood quality of *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden grown in Zambia. **Holzforschung**, v. 26, p. 138-141, 1972.

HARADA, M.; HAYASHI, Y.; HAYASHI, T.; KARUBE, M.; OHGAMA, T. Effect of moisture content of members on mechanical properties of timber joints. Journal of Wood Science, v. 51, p. 282-285, 2005.

HARTE, A. Introduction to timber as an engineering material. *In*: HARTE, A.; FORDE, M. Ice manual of construction materials. Ireland: Institution of Civil Engineers. 2009.

HE, S.; LIN, L.; WU, Z.; CHEN, Z. Application of finite element analysis in properties test of finger-jointed lumber. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 5, n. 2, p. 124-133, 2020.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; CHAIX, G. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 82, p. 119-129, 2009.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T. Relationships between microfibril angle, modulus of elasticity and compressive strength in *Eucalyptus* wood. **Maderas, Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 14, n. 3, p. 267-274, 2012.

HERNANDEZ, R. Analysis of strain in finger-jointed lumber. *In*: World conference on timber engineering – WCTE, 1998, Montreaux. *Proceedings*... Montreaux, 1998

HILLIS, W. E.; BROWN, A. G. Eucalypts for wood production. Melbourne: CSIRO, 1978.

HOLECEK, T.; GASPARIK, M.; LAGANA, R.; BORUVKA, V.; OBERHOFNEROVÁ, E. Measuring the modulus of elasticity of thermally treated spruce wood using the ultrasound and resonance methods. **BioResources**, v. 12, n. 1, p. 819-838, 2017.

HOLMBERG, S.; PERSSON, K.; PETERSSON. H. Nonlinear mechanical behavior and analysis of wood and fibre materials. **Computers and structures**, v. 72, n. 4. p. 459–480, 1999.

HU, W.; WAN, H.; GUAN, H. Size Effect on the Elastic Mechanical Properties of Beech and Its Application in Finite Element Analysis of Wood Structures. **Forests**, v. 10, 2019.

IEJAVS, J.; PODNIEKS, M.; UZULS, A. Some physical and mechanical properties of wood of Fast-growing tree species eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and radiata pine (*Pinus radiata* D.Don). Agronomy Research, v. 19, n. 2, p. 434–443, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Indicadores:PesquisaIndustrialMensal.Disponívelem:https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/228/pim_pfbr_2022_jan.pdf.Acesso emjan 2022.

IRACE, F. Factors affecting the strength of wood. Disponível em: <u>https://ezinearticles.com/?Factors-Affecting-The-Strength-Of-Wood&id=5908591</u>. Acesso em fev 2021.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: Fupef. 2005.

IWAKIRI, S.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de; PRATA, J. G.; COSTA, A. C. B. Utilization of wood of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunniifor* oriented strand board–OSB manufacturing. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 265–270, 2008.

JAUSLIN, C.; PELLICANE, P. J.; GUTKOWSKI, R. M. Finite-Element Analysis of Wood Joints. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 7, n. 2, p. 50-58, 1995.

JEONG, G. Y.; PARK, M. J. Evaluate orthotropic properties of wood using digital image correlation. **Construction Building** Materrials, v. 113, p. 864-869, 2016.

JOKERST, R. W. Finger-jointed wood products. Forest Products Laboratory, Madison, n. 382. 1981.

KEATING, T. J.; WOLF, P. R.; SCARPACE, F. L. An improved method of digital image correlation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 41, n. 8, p. 993-1002, 1975.

KERMANI, A. Structural Timber Design. 1 ed. Hoboken: Wiley-Blackwel, 1999.

KHELIFA, M.; LAHOUAR, M. A.; CELZARD, A. Flexural strengthening of finger jointed Spruce timber beams with CFRP. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 29, n.19, p. 2104-2116, 2015.

KING, E. G. Jr. Time-dependent strain behavior of wood. Forest Products Journal, v. 11, n. 156, 1961.

KOLLMANN, F. F. P. Mechanics and rheology of wood. *In*: **Principles of wood science and technology**. Berlim: Springer, 1968. p. 292-419.

KOLLMANN, F.; KRECH, H. **Dynamic measurement of the damping capacity and elastic properties of wood**. Madison: Forest Products Laboratory, 1960. 30 p. Relatório Técnico n. 414.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, A. Jr. **Principles of Wood Science and Technology**: I Solid Wood. New York: Springer-Verlag, 1968.

KONNERTH, J.; VALLA, A.; GINDL, W.; MÜLLER, U. Measurement of strain distribution in timber finger joints. **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 631-636, 2006.

KRUG, C. A.; ALVES, A. S. *Eucalyptus* improvement. **Journal of Heredity**, n. 40, v. 5 - 6, p. 133-9 - 143-9, 1949.

KRZYSIK, F. Nauka o drewnie. Wood science. Varsóvia: PWN, 1978.

KUTSCHA, P.; CASTER, R.W. Factors affecting the bond quality of hem-fir finger-joints. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 37, n. 4, p. 43-48, 1987.

LAHR, F. A. R.; NOGUEIRA, M. C. de J. A.; ARAUJO, V. A. D.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L. Wood utilization of *Eucalyptus grandis* in structural elements: densities and mechanical properties. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 5, p. 642–647, 2018.

LARA-BOCANEGRA, A. J.; MAJANO-MAJANO, A.; ARRIAGA, F.; GUAITA, M. *Eucalyptus globulus* finger jointed solid timber and glued laminated timber with superior mechanical properties: Characterisation and application in strained gridshells. **Construction and Building Materials**, v. 265, n. 2020, 2020.

LEICHTI, R. J. *In*: International Conference of Timber Engineering, 1988, Seatle. *Proceedings*... Forest Products Research Society, v. 1, p. 647-653. 1988. Seatle, 1988.

LIANG, S. Q.; FU, F. Comparative study on three dynamic modulus of elasticity for lodgepole pine lumber. **Journal of Forestry Research**, v. 18, n. 4, p. 309-312, 2007.

LOBÃO, M. S.; LÚCIA, R. M. D.; MOREIRA, M. S. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físicos-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, J. L. Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 76, p. 429-438, 2013.

LU, Z.; ZHOU, H.; LIAO, Y.; HU, C. Effects of surface treatment and adhesives on bond performance and mechanical properties of cross-laminated timber (CLT) made from small diameter *Eucalyptus* timber. **Construction and Building Materials**, v. 161, n. 2018, p. 9–15, 2018.

LUCAS, J.; HARRIS, R. M. B. Changing climate suitability for dominant *Eucalyptus* species may affect future fuel loads and flammability in Tasmania. **Fire**, v. 4, n. 1, p. 1-17, 2021.

LUXFORD, R. F.; Krone, R. H. End Joints of Various Types in Douglas-fir and White Oak Compored for Strength. Forest Products Laboratory. 1946. Relatório Técnico n. 1622.

MACÊDO, A. N. **Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC)**: avaliação de método de ensaio. 1996. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MACKERLE, J. Finite element analyses in wood research: a bibliography. **Wood Science Technology**, p. 579-600, 2005.

MADSEN, B.; LITTLEFORD, T. W. Finger-joints for structural usage. Forest Products Journal, LaGrange, v. 12, n. 2, p. 68-73, 1962.

MAIDEN, J. H. Botany bay of *Eucalyptus kino*. American Journal of Pharmacy, p. 221-222, 321-323, 1889.

MALAN, F. S. Genetic variation in growth tree and wood properties among 18 full-sib families of South African grown *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden): A preliminary investigation. **South African Forestry Journal**, n. 146, p.37-42, 1988.

MALAN, F.S. The wood properties and qualities of three South African-grown *Eucalyptus* hybrids. South African Forestry Journal, n. 167, p. 35-44, 1993.

MALAN, F. S. Eucalyptus improvement for lumber production. Division of Forest Science and Technology, South Africa. IN: Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria. São Paulo. Anais. p. 1 - 19. 1995.

MARIN, C. P. Avaliação da resistência de emendas dentadas para madeira laminada colada. 2006. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MARKWARDT, L. J.; WILSON, T. R. C. Strength and related properties of woods grown in the United States. Washington D.C.: United States Department of Agriculture, 1935. 67p. Relatório técnico n. 479.

MARRA, G. The role of adhesion and adhesives in the wood products industry. *In*: GILLESPIE, R. H. (Ed.) Adhesives for wood. Research applications, and needs. Madison: Forest Products Laboratory, 1984. p. 2-9.

MARTIN, B. *Eucalyptus*: A Strategic forest tree. *Eucalyptus* Plantations, 16 p., 2003. DOI: 10.1142/9789812704504_0001

MÄRTENSSON, A.; THELANDERSSON, S. Effect of moisture and mechanical loading on wooden materials. **Wood Science and Technology**, v. 24, n. 3, p. 247-261, 1990.

MASCIA, N. T.; LAHR, F. A. R. Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. **Materials Research**, v. 9, n. 3, p. 301-310, 2006.

MCCORMICK, N.; LORD, J. Digital Image Correlation. Materials Today, v. 13, n. 12, p. 52-54, 2010.

MEDERSKI, P. S.; BEMBENEK, M.; KARASZEWSKI, Z.; GIEFING, D. F.; SULIMA-OLEJNICZAK, E.; ROSINSKA, M.; LACKA, A. Density and mechanical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood from a seedling seed orchard. **Drewno**, v. 58, n. 195, p. 117– 124, 2015.

MEGRAW, R. A. Wood quality factors in loblolly pine. The influence of tree age, position in tree, and cultural practice on wood specific gravity, fiber length and fibril angle. Atlanta: TAPPI Press, Technology Park, 1985.

MELO, J. E.; CORADIN, V. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. *In*: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6, 1990, Campos do Jordão. *Anais...* Campos do Jordão, 1990. v. 3. p. 695-705.

MILNER, H. R.; YEOH E. Finite element analysis of glued timber finger joints. Journal of Structural Engineering, v. 117, p. 755-766, 1991.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). Dados revisados do déficit habitacional e inadequação de moradias nortearão políticas públicas. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/dados-revisados-do-deficit-habitacional-e-inadequacao-de-moradias-nortearao-politicas-publicas. Acesso em mai 2021.

MIRANDA, A. C. **Produtividade, estabilidade e adaptabilidade em progênies de** *Eucalyptus grandis.* 2012. 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Botucatu, 2012.

MOHAMMAD, M. Finger-joint process and products quality. Québec: FP Innovations. 2004. Relatório Técnico.

MOODY, R. C.; FALK, R. H. Development of design stresses for glulam timber in the United States. *In*: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, 2, 1989, Auckland. *Proceedings*... 1989. p. 309-313.

MOODY, R. C.; BOHANNAN, B. Flexural properties of glued-laminated southern pine beams-finger joint and specific gravity effects. **Forest Products Laboratory**. 1971.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. Curitiba, 2014. (apostila). Disponível em: <u>http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/PROPRIEDADES%20DA%20MADEIRA.p</u> <u>df</u>

MUELLER, F. V. Report on the forest resources of Western Australia. Londres: Reeve, 1879.

MYBURG, A.; GRATTAPAGLIA, D.; TUSKAN, G. et al. The genome of *Eucalyptus grandis*. Nature, v. 510, p. 356–362, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nature13308

NELSON, N. D.; HEATHER, W. A. Wood Color, Basic Density, and Decay Resistance in Heartwood of Fast-Grown *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Holzforschung**, n. 26, v. 2, p. 54-60,1972.

NIEKERK, J. V.; PIZZI, A. V. Characteristic industrial technology for exterior *Eucalyptus* particleboard. Holz als Roh-und Werkstoff, v. 52, n. 2, p. 109–112, 1994.

ÖZÇIFÇI, A.; YAPICI, F. Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations. **Construction Building Materials**, v. 22, p. 1543-1550, 2008.

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

PAN, B.; QIAN, K.; XIE, H.; ASUNDI, A. Two-dimensional digital image correlation for inplan displacement and strain measurement: a review. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 6, 17p, 2009.

PAN, Q.; XU, G. Construction of minimal subdivision surface with a given boundary. **Computer-Aided Design**, v. 43, n. 4, p. 374-380, 2011.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4 ed. New York: Mc Graw Hill, 1980.

PALLETT, R. N.; SALE, G. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in *Eucalyptus* pulpwood stands. Forest Ecology and Management, n. 193, v. 1-2, p. 33-43, 2004.

PELLICANE, P. J. Finite element analysis of finger-joints in lumber with dissimilar laminate stiffnesses. **Forest Products Journal**, v. 44, n. 3, p. 17-22, 1994.

PLANCHON, J. E. The *Eucalyptus globulus* from a Botanic, Economic, and Medical Point of View: Embracing Its Introduction, Culture, and Uses. U. S. Government Printing Office, 1875.

QU Z.; FAN, C. Tensile strength of glued finger joints in timber structure and recommendation for their series. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 1988, Seattle. *Proceedings*... Seattle, 1988. p. 654-662.

RANTA-MAUNUS, A. The viscoelasticity of wood at varying moisture content. **Wood** Science and Technology, v. 9, n. 3, p. 189-205, 1975.

RATNASINGAM, J.; SCHOLZ, F. Optimization of finger-jointing in rubber wood processing. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 67, p. 241-242, 2009.

RENAUDIN, P. Approche probabiliste du comportement mecanique du bois de structure, prise em compte de la variabilite biologique. Tese. Ecole Normale Superieure de Cachan, Paris. France. 1997.

RESENDE, M. D. V.; HIGA, A. R. Estratégias de melhoramento para *Eucalyptus* visando a seleção de híbridos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 21, p. 49-60, 1990.

RICHARDS, D. B.; GOODRICK, F. E. Tensile strength of scarf joints in Southern Pine. Forest **Products Journal**, v. 9, n. 6, p. 177-179, 1959.

RODRIGUES, E. B.; ROBALLO, E. A.; SATURNINO, K.; SCAIN, L.; ROSSO, S. Avaliação da massa específica de *Cedrella fissilis* em comparativo com demais espécies nativas. *In*: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 10, 2018, Bagé. Anais...Bagé: Unipampa, 2020.

ROSA, T. S.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; BONDUELLE, G. M. Use of five *Eucalyptus* species for particleboards manufacture. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 2, 2017.

ROSS, R. J. **Nondestructive evaluation of wood**: 2 ed. Madison: Forest Products Laboratory. 2015. 169 p. Relatório Técnico.

SAID, M. E. A. A. **Finger-joint optimization of spruce lumber using Finite Element and statistical modelling**. 2018. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia e Ciências Aplicadas, Memorial University of Newfoundland, Newfoundland and Labrador, 2018.

SAID, M. E.; HUSSEIN, A.; LYE, L. M. Numerical 3-D FEM of finger-joint configuration for spruce lumber. *In*: CANADIAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERING. ANNUAL CONFERENCE, 2018, Fredericton. *Proceedings*... Fredericton: Canadian Society for Civil Engineering, 2018. p. ST51.1-ST51.9.

SALES, C. La scie a ruban: théorique et pratique du sciage des bois en grumes. Nogentsur-Marne: Centre Technique Forestier Tropical, 1990.

SANDOZ, J. L. Grading of construction timber by ultrasound. **Wood Science Technology**, v. 23, n. 1, p. 95-108, 1989.

SANGUMBE, L. M. V.; PIRES, L. M. E.; ASCENÇÃO, J. A. Densidade básica e características anatómicas da madeira de nove espécies da floresta do Maiombe, Província de Cabinda, Angola. **Revista digital de Medio Ambiente "Ojeando la agenda"**, n.57, p.12-25, 2019.

SANTOS, P. E. T. DOS; GERALDI, I. O.; GARCIA, J. N. Estimates of genetic parameters of wood traits for sawn timber production in *Eucalyptus grandis*. Genetics and Molecular Biology, v. 27, n. 4, p. 567–573, 2004.

SAVIANA, J.; ZITOO, S.; PITER, J. C. Bending strength and stiffness of structural laminated veneer lumber manufactured from fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis*. Maderas. Ciencia y Tecnología, Concepción, vol. 11, no. 3, pp. 183–190, 2009.

SAVIDGE, R. A. Tree growth and wood quality. *In*: BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. **Wood quality and its biological basis**. New York: CRC Press, Blackwell Publishing, 2003. p. 1-29.

SCAPINELLO, R. Análise da estabilidade lateral em vigas de madeira lamelar colada. 2021. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.

SCHIMLECK, L. R.; KUBE, P. D.; RAYMOND, C. A. Genetic improvement of kraft pulp yield in *Eucalyptus nitens* using cellulose content determined by near infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, n. 34, v. 11, p. 2363-2370, 2004.

SELBO, M. L. Test for Quality of Glue Bonds in End-Jointed Lumber. Forest Products Laboratory, 1962.

SELBO, M. L. Effect of joint geometry on tensile strength of finger joints. Forest Products Journal, v. 13, n. 9, p. 390-400, 1963.

SENALIK, C. A; FARBER, B. Mechanical properties of wood. *In*: Wood Handbook. Madison: USDA Forest Service, 2021. p. 5.1-5.46.

SERRANO, L. J. P. **Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola, seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas dentadas**. 2009. 107 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

SERRANO, E.; GUSTAFSSON, P. J. Influence of bond line brittleness and defects on the strength of timber finger-joints. **International Journal of Adhesives and Adhesion**, v. 19, p. 9-17, 1999.

SHIMOYAMA, V. R. Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp. 1900. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. Acta Amazônica, Manaus, v. 43, n. 2, p.179–184, 2013. DOI: 10.1590/S0044-59672013000200007

SINGH, R.; UPADHYAY, S. K.; SINGH, B. J.; VERMA, R.; SHARMA, I.; SHARMA, P.; RANI, A.; SINGH, C. Allelopathic effect of Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh) on the growth of *Aloe vera*. **Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology**, v. 22, n. 21-22, p. 94-100, 2021.

SMARDZEWSKI, J. Distribution of stresses in finger joints. **Wood Science and Technology**, v. 30, p. 477-489, 1996.

STÜPP, Â. M. Avaliação do desempenho de emendas por entalhes múltiplos para estruturas em madeira laminada colada. 2016. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2016.

SZÜCS, C. A.; BOHN, A. R.; VALLE, A. do. Corpos de prova para a caracterização de elementos produzidos em madeira laminada colada. *In*: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6, Florianópolis. **Anais**... Florianópolis, 1998. p. 170-180.

TANG, Z. Z.; LIANG, J.; GUO, C.; WANG, Y. X. Photogrammetry-based two-dimensional digital image correlation with non-perpendicular camera alignment. **Optical Engineering**, Redondo Beach, v. 51, n. 2, p. 3602, 2012.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. Construções Rurais e Ambiência. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, 2005.

TAYLOR, F. W. Variation in the anatomical properties of South African grown *Eucalyptus grandis*. Appita, v. 27, n. 3, p. 171-184, 2010.

TEREZO, R.F.; SZÜCS, C.A. Análise de desempenho de vigas em madeira laminada colada de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 471-480, 2010.

THUNELL, B. Die Festigkeitseigenschaften schwedischen Kiefernholzes. Ing. Vetensk. Akad., Handl, v. 161, p. 1-45, 1941.

TIBITS, W. N.; DEAN, G.; FRENCH, J. Relative pulping properties of *Eucalyptus nitens* × *E. globulus* F1 hybrids. *In*: CRCTHF-IUFRO CONFERENCE EUCALYPTUS PLANTATION: IMPROVING FIBRE YIELD AND QUALITY Hobart (Tasmania). *Proceedings*... Hobart: 1995. p. 83-84.

TIEMANN, H. D. Effect of Moisture Upon the Strength and Stiffness of Wood. Washington: Government Printing Office, 1906, 144 p. Relatório Técnico n. 70.

TIMBOLMAS, C.; RESCALVO, F. J.; PORTELA, M.; BRAVO, R. Analysis of poplar timber finger joints by means of Digital Image Correlation (DIC) and finite element simulation subjected to tension loading. **European Journal of Wood Products**, 2022.

TODD, G. B. Notes on the Eucalyptus Oils Presently Used in Medicine, with a Short History of the Oils Used during the Last Ten Years. **Glasgow Medical Journal**, n. 46, v. 5, p. 346 – 355, 1896. Artigo de 1874, lido no encontro médico em 1896.

TOMÉ, M. D.; ALMEIDA, M. H.; BARREIRO, S.; BRANCO, M. R.; DEUS, E. J. R. C. de.; PINTO, G.; SILVA, J. S.; SOARES, P.; SOALLEIRO, R. R. Opportunities and challenges of *Eucalyptus* plantations in Europe: the Iberian Peninsula experience. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 489–510, 2021.

TRAN, V. D.; OUDJENE, M.; MÉAUSOONE, P. J. Finite Element Analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 52, p. 40-47, 2014.

TSOUMIS, G. Science and Technology of Wood. Structure, Properties, Utilization. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

TURÓN, B.; ZIAJA, D.; MILLER, B. Registration and analysis of the displacements and strains fields with the use of the digital image correlation system 3D. Czasopismo Inzynierii Ladowej, Srodowiska i Architektury (Journal of Civil Engineering and Environmental Architecture), v. 34, p. 7–28, 2017. (Em Polonês).

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

VALE, A. T.; SARMENTO, T. R.; ALMEIDA, A. N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília - DF. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 411-420, 2005.

VALLE, Â. do; MORAES, P. D. de; SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F. **Estruturas de Madeira.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015. Apostila digitada.

VALLE, I. M. R. de. A pré-fabricação de dois sistemas de cobertura com madeira de florestas plantadas: estudos de casos: os assentamentos rurais de Pirituba II e Sepé Tiaraju. 2011. 350 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). São Carlos - SP. 2011.

VASSILIOU, V.; KARASTERGIOU, S.; BARBOUTIS, J. Bending strength properties of finger jointed oakwoods. Holz als Roh-und Werkstoff, Springer-Verlag, 2005.

VASSILIOU, V.; BARBOUTIS, I.; AJDINAJ D.; THOMA, H. PVAc bonding of fingerjointed beech wood originated from Albania and Greece. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE "WOOD SCIENCE AND ENGINEERING IN THE THIRD MILLENNIUM", 7, 2009, Transilvânia. *Proceedings*... Transilvânia: University of Braşov, 2009. p. 715-721.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. *In*: **Wood Handbook**. Madison: USDA Forest Service, 1999. p. 9.1-9.24.

VIVIAN, M. A.; MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; CARVALHO, D. E.; MORAIS, W. W. C.; SOUZA, J. T.; GATTO, D. A. Estivativa dos Módulos de elasticidade e ruptura da madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell por meio de método não destrutivo. **Ciência da Madeira**, v. 03, n. 02, p. 91-101, 2012.

WACKER, J. P. Use of Wood in Buildings and Bridges. *In*: Wood Handbook. Madison: USDA Forest Service, 2021. p. 17.1-17.13.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. *In*: **Wood Handbook**. Madison: USDA Forest Service, 1999. p. 9.1-9.24.

WALFORD, B. G. Effect of finger length on finger-joint strength in *Radiata pine*. WOLRD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 6, 2000, British Columbia. *Proceedings*... Vancouver, B. C.: Conference Secretariat, 2000.

WARREN, W. H. Australian Timbers. Sidney: government printer, 1882.

WARREN, W. H. The strength, elasticity, and other properties of New South Wales hardwood timbers. Sidney: government printer, 1887.

WASHINGTON, P. **Digital Image Correlation**. Disponível em: https://slideplayer.com/slide/7008770/. 2015. Acesso em out 2021. WIEDENHOEFT, A. C. Structure and Function of Wood. *In*: **Wood Handbook**. Madison: USDA Forest Service, 2010. p. 3.1-3.18.

XIAO, L. P.; LIN, Z.; PENG, W. X. et al. Sustain. Chemical Processing, v. 2, n. 1, p. 9, 2014.

XIE, H.; KANG, Y. Digital image correlation technique. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 65, p. 1-2, 2015.

YEH, M. C.; LIN, Y. L. Finger joint performance of structural laminated bamboo member. Journal of Wood Science, v. 58, p. 120-127, 2012.

YONEYAMA, S.; MURASAWA, G. **Digital Image Correlation, in Experimental Mechanics**. *In*: ENCYCLOPEDIA OF LIFE SUPPORT SYSTEMS (EOLSS). Disponível em: https://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-194-04.pdf. Acesso em out 2021.