



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

LEONOR DA CUNHA MASTELA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL, TEÓRICA E NUMÉRICA EM VIGAS DE MADEIRA
LAMELADA COLADA DE EUCALIPTO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2023

LEONOR DA CUNHA MASTELA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL, TEÓRICA E NUMÉRICA EM VIGAS DE MADEIRA
LAMELADA COLADA DE EUCALIPTO**

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

Orientador: Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Coorientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

M423a Mastela, Leonor da Cunha, 1980-
Avaliação experimental, teórica e numérica em vigas de madeira lamelada colada de eucalipto / Leonor da Cunha Mastela. - 2023.
159 f. : il.

Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.
Coorientador: Fabricio Gomes Gonçalves.
Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Estruturas de madeira. 2. Simulação. 3. Método dos elementos finitos. 4. Deformações e tensões. I. Segundinho, Pedro Gutemberg de Alcântara. II. Gonçalves, Fabricio Gomes. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630*38

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL, TEÓRICA E NUMÉRICA EM VIGAS DE
MADEIRA LAMELADA COLADA DE EUCALIPTO**

Leonor da Cunha Mastela

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

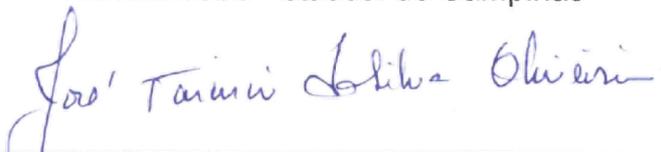
Aprovada em 16 de fevereiro de 2023.



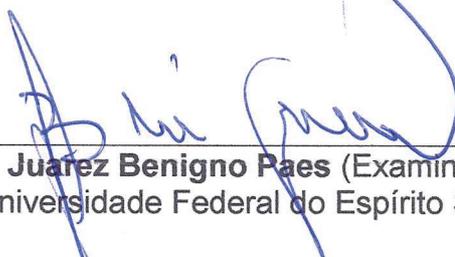
Prof. Dr. André Luis Christoforo (Examinador externo)
Universidade Federal de São Carlos



Prof. Dr. Julio Soriano (Examinador externo)
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Juarez Benigno Paes (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Para Rafaela e Milena, com todo meu amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que em sua infinita bondade, esteve sempre a meu lado neste caminho de tantas dificuldades.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), por me conceder esta oportunidade, e por disponibilizar toda estrutura para o desenvolvimento do estudo.

A minha família, pelo apoio incondicional. Sobretudo, aos meus pais, que foram a minha força e meu alicerce em todos os momentos. Sem eles seria impossível conquistar mais esta etapa. As minhas filhas Rafaela e Milena, que são minha maior inspiração em tudo que faço.

Ao Prof. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela confiança durante todas as etapas do doutorado. Pela orientação e sugestões.

Ao Prof. Fabricio Gomes Gonçalves por todas as contribuições ao desenvolvimento deste trabalho e por sempre me incentivar e apoiar.

Ao Prof. José Tarcísio da Silva Oliveira, que desde meu primeiro dia de trabalho na UFES me recebeu com todo carinho.

Ao Prof. Juarez Benigno Paes que me acolheu e que tanto contribui para meu aprendizado na área de Ciências Florestais.

Ao Prof. Michel Picanço Oliveira por sua disponibilidade e contribuições nas imagens realizadas no microscópio confocal.

Ao professor Ananias Francisco Dias Júnior e aos alunos do laboratório de Energia da Biomassa que me auxiliaram no ensaio de teor de cinzas da madeira.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Madeira. Aos professores José Tarcísio da Silva Oliveira, Juarez Benigno Paes, André Luis Christoforo e Julio Soriano por aceitarem participar da banca examinadora.

A Elizangela, por sua atenção e disponibilidade. A todos os servidores do PPGCF que sempre estiveram disponíveis, em especial, Elecy Palácio, José Geraldo Lima de Oliveira, Luciano da Costa Dias e Calebe Izidoro Pereira. Ao pesquisador João Gabriel Missia da Silva, por sua disponibilidade e contribuições a este trabalho.

À UFES, em especial a Diretoria de Infraestrutura Sul – DIS/UFES, por me conceder o afastamento parcial, permitindo que pudesse me dedicar ao estudo. Ao

Diretor de Infraestrutura, Erivelton Costa e Souza, que me apoiou em todos os momentos. A todos os meus colegas de trabalho que sempre me incentivaram.

Ao meu amigo Vinicius Borges Taquetti, que foi meu grande incentivador para a realização do doutorado e que esteve comigo durante essa jornada, me ouvindo nos momentos difíceis e me auxiliando na parte experimental.

A amiga que conheci durante o doutorado, Clara Gaspar Fossi de Souza, com quem aprendi sobre madeira e, principalmente, sobre a vida. Sua contribuição e apoio foram muito importantes para a concretização deste trabalho.

A amiga Marlice, companheira de disciplinas e de viagem. Por todo apoio e por acreditar em mim.

Aos amigos que fiz e que ficarão para a vida, Augusto Melo Moulin Breda, Ramon Ferreira Oliveira e Raynord Mayard. A amiga Silvani Ferrari, que tem o melhor abraço do mundo, que me incentivou e rezou por mim durante essa jornada. As amigas, Nilceia Tavares e Cristina Vallory que me confortaram e me apoiaram durante esta etapa de tantas barreiras a vencer.

A Carla Moreira por suas contribuições na revisão ortográfica.

RESUMO GERAL

MASTELA, Leonor da Cunha. **Avaliação experimental, teórica e numérica em vigas de madeira lamelada colada de eucalipto**. 2023. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho. Coorientador: Fabricio Gomes Gonçalves.

O objetivo deste estudo foi realizar uma avaliação analítica, experimental e numérica do comportamento estrutural de vigas de madeira lamelada colada (MLC) produzidas com madeira de clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* quando submetidas a carregamentos estáticos. Para a fabricação das vigas, procedeu-se a caracterização física, química e mecânica da madeira. Foram produzidas 12 vigas com seis lamelas coladas com os adesivos melamina-ureia-formaldeído (MUF), resorcinol-formaldeído (RF) e poliuretano (PUR), sendo quatro vigas por adesivo. Após a produção das vigas, foi realizada a caracterização das propriedades mecânicas por meio de ensaios não destrutivos e destrutivos com o objetivo de avaliar os comportamentos experimentais delas. Por fim, as vigas de MLC foram ensaiadas a flexão estática a quatro pontos. Um modelo numérico foi desenvolvido no *software* SAP 2000, com o método dos elementos finitos para simular o desempenho mecânico das vigas, para posterior comparação com os dados experimentais. O método da seção transformada foi empregado para a avaliação teórica da resistência e da rigidez das vigas de MLC. Os resultados mostraram que a madeira estudada associada aos adesivos MUF, RF e PUR apresentaram potencial para aplicação como elemento estrutural em MLC. A análise das tensões de compressão e tração obtidas por ensaio de flexão permitiram afirmar que as tensões teóricas e numéricas determinadas apresentaram resultados próximos aos experimentais, validando as hipóteses adotadas e a modelagem numérica. Concluiu-se que a modelagem numérica embasada no método dos elementos finitos forneceu resultados satisfatórios que permitem simular o ensaio experimental e, estão em consonância com o modelo teórico.

Palavras-chave: simulações numéricas. método dos elementos finitos. flexão estática. ensaios não destrutivos. Tensões normais.

GENERAL ABSTRACT

MASTELA, Leonor da Cunha. **Experimental, theoretical and numerical evaluation of glued laminated timber beams of eucalyptus**. 2023. Thesis (Doctor of Forest Science) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, Co-Advisor: Fabrício Gomes Gonçalves.

The objective of this study was to carry out an analytical, experimental and numerical evaluation of the structural behavior of glulam beams produced from the wood of a clone of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* when subjected to static loads. or the manufacture of the beams, the physical, chemical and mechanical characterization of the wood was carried out.. Twelve beams were produced with six lamellae glued with melamine-urea-formaldehyde (MUF), resorcinol-formaldehyde (RF) and polyurethane (PUR) adhesives, four beams per adhesive. After the production of the beams, the characterization of the mechanical properties was carried out through non-destructive and destructive tests in order to evaluate the experimental behavior of the beams. Finally, the glulam beams were tested in four-point bending. A numerical model was developed in the SAP 2000 software, using the finite element method to simulate the mechanical performance of the beams, for later comparison with the experimental data. The transformed section method was employed for the theoretical evaluation of strength and stiffness of glulam beams. The results showed that the studied species associated with MUF, RF and PUR adhesives has potential for application as a structural element in glulam. The analysis of the compressive and tensile stresses obtained by bending tests allowed us to state that the determined theoretical and numerical stresses presented results close to the experimental, validating the adopted hypotheses and the numerical modeling. It was concluded that numerical modeling based on the finite element method provided satisfactory results that allow simulating the experimental test and are in line with the theoretical model.

Keywords: numerical simulations. finite element method. static bending. non-destructive testing. normal strains.

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 | REFERÊNCIAS | 12 |
| 3 | OBJETIVOS | 14 |
| 3.1 | OBJETIVO GERAL | 14 |
| 3.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 4 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 4.1 | MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO NO BRASIL | 15 |
| 4.2 | EUCALIPTOS | 16 |
| 4.3 | HISTÓRIA E APLICAÇÃO DA MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC) | 19 |
| 4.4 | ADESIVOS E SUA INFLUÊNCIA NA ADESÃO | 23 |
| 4.5 | NORMAS INTERNACIONAIS APLICADAS A MLC | 25 |
| 4.6 | MODELAGEM NUMÉRICA | 28 |
| 4.6.1 | Método dos elementos finitos | 29 |
| 4.6.2 | <i>Structural analysis program - SAP2000</i> | 32 |
| 5 | REFERÊNCIAS | 34 |
| | CAPÍTULO I - CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DO CLONE DE EUCALIPTO PARA APLICAÇÃO EM ELEMENTOS COLADOS | 44 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 46 |
| 2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 47 |
| 2.1 | Classificação visual e caracterização física | 47 |
| 2.2 | Caracterização química | 48 |
| 2.3 | Caracterização mecânica por meio de ensaios não destrutivos | 49 |
| 2.4 | Análise estatística | 51 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 52 |
| 3.1 | Classificação visual | 52 |
| 3.2 | Caracterização física | 52 |
| 3.3 | Caracterização química | 54 |
| 3.4 | Caracterização mecânica por meio de ensaios não destrutivos | 55 |
| 4 | CONCLUSÕES | 59 |
| 5 | REFERÊNCIAS | 59 |
| | CAPÍTULO II - COMPORTAMENTO DA ADESÃO A TRÊS ADESIVOS ESTRUTURAIS EM MADEIRA DE EUCALIPTO | 66 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 68 |
| 2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 69 |
| 2.1 | Materiais | 69 |
| 2.2 | Caracterização dos adesivos | 70 |
| 2.3 | Preparo das lamelas e montagem das vigas de madeira lamelada colada (MLC) | 71 |
| 2.4 | Retirada dos corpos de prova | 73 |
| 2.5 | Cisalhamento na linha de cola e falha na madeira | 74 |
| 2.6 | Mensuração da espessura da linha de cola por fotomicrografia | 75 |
| 2.7 | Delaminação | 77 |
| 2.8 | Microdensitometria de Raio X | 77 |
| 2.9 | Resistência à perfuração | 78 |
| 2.10 | Análise estatística | 79 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 80 |
| 3.1 | Caracterização dos adesivos | 80 |
| 3.2 | Cisalhamento na linha de cola e falha na madeira | 81 |
| 3.3 | Mensuração da espessura da linha de cola | 83 |

| | |
|--|------------|
| 3.4 Delaminação | 85 |
| 3.5 Microdensitometria de Raio X e resistência à perfuração | 86 |
| 4 CONCLUSÕES | 89 |
| 5 REFERÊNCIAS | 89 |
| CAPÍTULO III - AVALIAÇÃO DESTRUTIVA E NÃO DESTRUTIVA EM VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE EUCALIPTO | 96 |
| 1 INTRODUÇÃO | 98 |
| 2 MATERIAIS E MÉTODOS | 99 |
| 2.1 Caracterização mecânica por meio de ensaios não destrutivos | 100 |
| 2.2 Caracterização mecânica por meio de ensaios destrutivos | 103 |
| 2.3 Análise estatística | 105 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 106 |
| 3.1 Caracterização mecânica por meio de ensaios não destrutivos | 106 |
| 3.2 Caracterização mecânica por meio de ensaios destrutivos | 112 |
| 4 CONCLUSÕES | 114 |
| 5 REFERÊNCIAS | 115 |
| CAPÍTULO IV – ESTUDO ANALÍTICO, EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA | 119 |
| 1 INTRODUÇÃO | 121 |
| 2 MATERIAIS E MÉTODOS | 122 |
| 2.1 Avaliação experimental | 123 |
| 2.2 Avaliação analítica | 127 |
| 2.3 Avaliação numérica | 128 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 129 |

| | | |
|------------|--------------------------------|------------|
| 3.1 | Análise das deformações | 129 |
| 3.2 | Carga de serviço | 136 |
| 3.3 | Carga de ruptura | 140 |
| 3.4 | Modo de ruptura | 146 |
| 4 | CONCLUSÕES | 151 |
| 5 | REFERÊNCIAS | 151 |
| 6 | CONCLUSÕES GERAIS | 156 |

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais versáteis desde a antiguidade, apresenta baixo peso próprio em relação ao concreto, excelente absorção de impacto, baixo consumo energético para sua manufatura, além de ser uma fonte renovável (LESZCZYSZYN et al., 2022; İŞLEYEN et al., 2021). Na construção civil, ela pode ser empregada em várias etapas, que abrangem fôrmas, estruturas, pisos, esquadrias, forros, coberturas, revestimentos e detalhes arquitetônicos (CABRAL; BLANCHET, 2021).

Nos últimos anos, com a crescente preocupação com o meio ambiente e a exigência de medidas construtivas sustentáveis, os produtos processados mecanicamente de madeira são uma alternativa viável por permitirem maior aproveitamento do material e uso de árvore de reflorestamento. A produção de elementos estruturais de qualidade pode ser atingida com a utilização da madeira lamelada colada (MLC) (ZANGIACOMO et al., 2017a).

A MLC é o produto fabricado a partir da colagem de lamelas de madeira serrada com adesivos estruturais, dispostas de forma a que suas fibras estejam orientadas, paralelamente ao eixo longitudinal da peça (MIRSKI et al., 2021). O elemento colado apresenta vantagens em relação à madeira serrada, permitindo alcançar grandes vãos com formato reto ou curvo, o que possibilita a execução de projetos arquitetônicos com geometria não convencional, garantindo beleza e sofisticação (ILGIN; KARJALAINEN; KOPONEN, 2022; FU et al., 2020).

Além disso, o material tem como diferencial o emprego de madeira serrada de menor resistência, as quais podem ser aplicadas em lamelas próximas à linha neutra da peça. Dessa forma, torna-se imprescindível a classificação das lamelas para garantir que as de maior resistência sejam coladas nas faces externas, resultando em aumento da resistência e em rigidez do elemento estrutural (MASCIA et al., 2018a).

Apesar dos benefícios mencionados, a MLC ainda é um produto pouco utilizado no Brasil e existem poucas fábricas de produção deste material. Isso se deve, principalmente, ao elevado custo por metro cúbico, quando comparada à produção de madeira serrada (GARBE et al., 2020). Entretanto, fatores como estética, conforto e sustentabilidade são diferenciais deste material na construção civil. Para impulsionar a cadeia produtiva de MLC é necessário realizar pesquisas que permitam avanços tecnológicos (LEITE; SANTOS; DO VALLE, 2017).

Tais avanços estão associados à adoção de controle de qualidade na manufatura do produto. Nos casos em que este material é fabricado de forma adequada, tanto a madeira como os adesivos garantem um bom desempenho estrutural (CALIL NETO et al., 2017). O controle no processo de fabricação permite eliminar os defeitos das peças utilizadas na fabricação, os quais são responsáveis pela diminuição da resistência e rigidez. Sendo assim, a MLC apresenta resistência mecânica e módulo de elasticidade superior aos da madeira maciça (LESTARI et al., 2019).

A caracterização física e mecânica de elementos colados tem como objetivo garantir a qualidade na fabricação e a confiabilidade estrutural de peças de MLC (SULASTININGSIH et al., 2021; MARTINS; CRUZ; DIAS, 2019). Somando-se a estudos experimentais que devem ser realizados para caracterizar as vigas de MLC, torna-se necessária a modelagem numérica dos elementos estruturais (TRAN et al., 2018). Para este fim, pode-se adotar o método dos elementos finitos (MEF), que é uma ferramenta capaz de representar o comportamento mecânico das peças estruturais. A aplicação de modelagem numérica, embasada no MEF, implica na simulação do comportamento real da estrutura, visa reproduzir o real comportamento mecânico da estrutura (GUINDOS; POLOCOSER, 2015).

A modelagem numérica por meio de *softwares* que adotam o MEF garante uma resposta eficiente, o que possibilita uma melhor preparação para o estudo experimental, diminuindo os custos com ensaios (MARTINS; MUNAIAR NETO; CALIL NETO, 2015; CALIL NETO et al., 2017). O método pode ser utilizado na resolução e no diagnóstico de problemas de análise estrutural, por meio da obtenção de deslocamentos, deformações e tensões (SHAKIMON et al., 2016).

Dessa forma, considerando-se o potencial da MLC para emprego na construção civil e a possibilidade de modelagem, utilizando o MEF; este trabalho pretende comprovar a hipótese de que a validação numérica por meio do MEF é capaz de representar os valores experimentais obtidos em ensaios realizados em laboratório, levando-se em conta o regime linear. Para tanto, foram realizadas análises de forma a permitir a caracterização física e mecânica das vigas de MLC e a posterior inserção dos dados no *software* aplicado para a modelagem numérica. Além disso, os resultados experimentais foram utilizados para validar o modelo numérico e os resultados teóricos.

2 REFERÊNCIAS

- CABRAL, M. R.; BLANCHET, P. A state of the art of the overall energy efficiency of wood buildings - An overview and future possibilities. **Materials**, v. 14, n. 8, p. 1848, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14081848>
- CALIL NETO, C.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C; ROCCO LAHR, F. A. Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em X em corpos de prova de MLC com madeiras do tipo *Eucalypto urograndis*. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0121>
- GARBE, E. A; MATOS, J. L. M.; PEREIRA, D.; PRATA, J. G. Evaluación económica del proyecto de una pequeña industria de vigas laminadas encoladas en Brasil. *Revista Gestão Industrial*, v. 16, n. 4, 2020. <http://dx.doi.org/10.3895/gi.v16n4.10434>
- GUINDOS, P.; POLOCOSER, T. Numerical calculations of the influence of the slope of grain on the effect of knots. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 2, p. 271–273. 2015. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0876-7>
- ILGIN, E.; KARJALAINEN, M.; KOPONEN, O. Various geometric configuration proposals for dovetail wooden horizontal structural members in multistory building construction. In: *Engineered Wood Products for Construction*, 2022. <http://doi.org/10.5772/intechopen.101725>
- İŞLEYEN, U. K.; GHOROUBI, R.; MERCIMEK, Ö.; ANIL, Ö.; ERDEM, R. T. Behavior of glulam timber beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer strip for flexural loading. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 40, n. 17-18, p. 665-685, 2021. <https://doi.org/10.1177/2F0731684421997924>
- LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M; VALLE, I. M. R. O uso da madeira lamelada colada no Brasil: panorama e desafios. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 2, 2017, Buenos Aires, **Anais [...]**. Buenos Aires: Universidad Nacional Noroeste, 2017. p. 1-12.
- LESTARI, A. S. R. D.; HADI, Y. S.; HERMAWAN, D.; SANTOSO, A. Physical and mechanical properties of glued laminated lumber of pine (*Pinus merkusii*) and jabon (*Anthocephalus cadamba*). **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 46, n. 2, p. 143-148, 2018. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2018.46.2.143>
- LESZCZYSZYN, E.; HERÄJÄRVI, H.; VERKASALO, E.; GARCIA-JACA, J.; ARAYA-LETELIER, G.; LANVIN, J. D.; KOUYOUMJI, J. L. The future of wood construction: opportunities and barriers based on surveys in Europe and Chile. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 4358, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14074358>
- MARTINS, C.; DIAS, A. M. P. G.; CRUZ, H. Using non-destructive testing to predict the mechanical properties of glued laminated poplar. **Proceedings of the Institution**

of **Civil Engineers-Structures and Buildings**, v. 172, n. 9, p. 661-670, 2019.
<https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00060>

MASCIA, N. T.; BERTOLINE, C. A. A.; BASÁGLIA, C. D.; DONADON, B. F.;
Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by Vectran fibers.
Ambiente Construído, v. 18, n. 3, p. 359-373, 2018.
<https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300286>

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; KULIŃSKI, M.; TROCIŃSKI, A.; KAWALERCZYK,
J.; ANTONOWICZ, R. Strength properties of structural glulam manufactured from pine
(*Pinus sylvestris L.*) side boards. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7312, 2021.
<https://doi.org/10.3390/ma14237312>

SHAKIMON, M. N.; MALEK, N. J. A.; HASSAN, R.; AHMAD, Z. The finite element
modelling of glulam tropical timber beam in bending. **Jurnal Teknologi (Sciences &
Engineering)**, v. 78, n.5, p. 75–78, 2016.

SULASTININGSIH, I. M.; TRISATYA, D. R.; INDRAWAN, D. A.; MALIK, J.; PARI, R.
Physical and mechanical properties of glued laminated bamboo lumber. **Journal of
Tropical Forest Science**, v. 33, n. 3, p. 290-297, 2021.
<https://doi.org/10.26525/jtfs2021.33.3.290>

TRAN, T. T.; THI, V. D.; KHELIFA, M.; OUDJENE, M.; ROGAUME, Y. A constitutive
numerical modelling of hybrid-based timber beams with partial composite action.
Construction and Building Materials, v. 178, p 462–472, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.080>

ZANGIÁCOMO, A. L.; BALANCO, G. G.; CRHISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.
Glued laminated timber produced with tropical brazilian wood species. **Journal of
Applied Science and Technology**, v. 23, p. 1-12, 2017. doi:
10.9734/CJAST/2017/34690

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a análise analítica, experimental e numérica de vigas de madeira lamelada colada (MLC) produzidas a partir da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* quando submetidas a carregamentos estáticos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira de eucalipto do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* para aplicação em elementos colados;
- Avaliar o comportamento da adesão da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* com a aplicação por três tipos de adesivos estruturais;
- Caracterizar as propriedades mecânicas por meio de ensaios não destrutivos e destrutivos para avaliar o comportamento experimental de vigas de MLC produzidas com madeira de eucalipto;
- Comparar os resultados experimentais obtidos em vigas de madeira lamelada colada (MLC) produzidas a partir da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* em relação aos resultados obtidos por meio de simulações numéricas, utilizando o método dos elementos finitos (MEF) e os resultados teóricos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO NO BRASIL

O setor de árvores plantadas tem impacto relevante no desenvolvimento econômico do Brasil, sendo responsável por 1,2% no Produto Interno Bruto (PIB). Com o desencadeamento da pandemia da Covid-19, em 2020, houve uma desaceleração do comércio exterior, e o setor florestal passou de 5,1% para 4,8% de participação no total das exportações nacionais, entre 2019 e 2020. Apesar disso, a indústria de base florestal, segundo a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2021) obteve em 2020 um superávit de US\$ 8,9 bilhões.

As florestas plantadas são responsáveis pela geração de 2,9 milhões de empregos diretos e indiretos (IBÁ, 2021). Além disso, o setor contribuiu em 2020 para a arrecadação de R\$ 12,1 bilhões em tributos federais. Nesse ano, empresas relacionadas ao setor investiram R\$ 257 milhões em pesquisa e inovação direcionadas às florestas e à indústria florestal. De acordo com o Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA (2019), estima-se que serão investidos R\$ 32,9 bilhões até 2023 para ampliação das áreas de plantio, implantação de fábricas e novas unidades relacionadas ao setor.

Em 2020, o Brasil possuía cerca de 9,55 milhões de hectares de florestas plantadas, com predomínio das espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Os plantios de eucalipto corresponderam a 78% das espécies cultivadas e ocuparam 7,47 milhões de hectares localizados, principalmente, Minas Gerais (27,6%), São Paulo (18,1%) e Mato Grosso do Sul (15,1%) (IBÁ, 2021).

As áreas com plantações de pinus corresponderam a 1,6 milhão de hectares, que representa 18% das florestas plantadas e concentraram-se, sobretudo, no Paraná (43%) e em Santa Catarina (24%) (IBÁ, 2021; SNIF, 2021). As demais áreas de árvores plantadas no País são ocupadas por outras espécies, como acácia (*Acacia mearnsii*), seringueira (*Hevea spp.*), teca (*Tectona grandis*), paricá (*Schizolobium parahyba*) e araucária (*Araucaria angustifolia*). No Espírito Santo, a área plantada de eucalipto representa 230.918 hectares e a de pinus corresponde a 644 hectares (IBÁ, 2021).

O Brasil possui setores industriais altamente competitivos, devido ao rápido crescimento das plantações, que chegam a atingir produtividade 10 vezes superior à

observada em países considerados líderes do mercado mundial. Em 2020, o País atingiu uma produtividade média de 36,8 m³/ha.ano para os plantios de eucalipto, enquanto a de pinus foi de 30,4 m³/ha.ano (IBÁ, 2021).

Nesse contexto, o setor de madeira processada mecanicamente foi responsável pela produção de 10,2 milhões de m³ de madeira serrada no ano de 2020, o que garantiu ao País o 9º lugar como produtor (IBÁ, 2021). A construção civil é um importante mercado consumidor dos produtos desse setor, dentre os quais, destacam-se; compensado, madeira serrada, lâminas e os produtos manufaturados de valor agregado (PMVA) - portas, molduras, janelas, pisos e componentes para móveis (PINTO JÚNIOR; SILVEIRA, 2021; ARAÚJO et al., 2017).

Nessa ampla cadeia produtiva, que tem como base o setor florestal, a madeira serrada pode ser direcionada para as indústrias responsáveis pela fabricação de madeira lamelada colada (MLC). Apesar da madeira de pinus ser considerada a principal matéria-prima para produção da maioria dos elementos estruturais em MLC; no Brasil, a madeira de eucalipto surge como potencial opção pela disponibilidade e às suas propriedades físicas e mecânicas (PEREIRA; CALIL JUNIOR, 2019).

4.2 EUCALIPTOS

O *Eucalyptus* é um gênero arbóreo que pertence à família das Mirtáceas e tem sua origem na Austrália, Tasmânia e ilhas da Oceania. Possui mais de 700 espécies registradas, que devido às suas características distintas permitem sua utilização para diversos fins, dentre os quais, destacam-se celulose e papel, extração de óleos essenciais, indústria moveleira, laminação, estruturas, caixotaria, postes, escoras, painéis reconstituídos variados, mourões e carvão vegetal (BARROS; REZENDE; CAMPOS, 2019; EMBRAPA, 2020). No Brasil, as espécies do gênero eucalipto foram introduzidas no início século XX, no Estado de São Paulo, para utilização como dormentes (PINTO JÚNIOR; SILVEIRA, 2021).

O eucalipto apresenta, como vantagens, a alta produtividade, o ciclo de crescimento reduzido e a alta flexibilidade às condições edafoclimáticas. Como consequência de seu potencial econômico, é o gênero mais empregado em áreas de reflorestamento brasileiras (Figura 1) (PERTUZZATTI et al., 2017; JESUS; SILVA, 2020). Dentre as espécies mais utilizadas em plantios comerciais destacam-se o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *E. benthamii*, *E. brassiana*, *E. camaldulensis*,

E. dunnii e *E. tereticornis* e clones de várias espécies, com características desejáveis sobre o ponto de vista silvicultural e para a produção de madeira (SILVA et. al, 2017; EMBRAPA, 2020).

Figura 1 – Plantio e toras de eucalipto.



Fonte: Embrapa, 2021.

As variações genéticas das espécies de eucaliptos, somada à dominância gênica, considerando-se ainda a presença de caracteres específicos, levou à realização de programas de hibridação, visando o melhoramento genético, a fim de introduzir características de tolerância não presentes, nas espécies tradicionalmente utilizadas (GRATTAPAGLIA, 2021). O principal objetivo dos programas de melhoramento genético de eucalipto é a seleção de híbridos com boas características silviculturais e tecnológicas, que garantam o aumento de produtividade e de uniformização na qualidade da madeira (ARAÚJO et al., 2015).

Nesse sentido, o híbrido resultante do cruzamento do *Eucalyptus urophylla* com o *Eucalyptus grandis* foi desenvolvido no Brasil, na década de 1980, com objetivo de melhorar a produtividade e garantir maior resistência a pragas e doenças, em particular o fungo *Puccinia psiidi*, para uso, inicialmente, em plantas de celulose. O híbrido apresenta como principais características; densidade superior às espécies originárias (0,48 e 0,60 g/cm³), alta taxa de crescimento volumétrico e cerne distinto do alburno e de cor rosa claro (HSING; PAULA; PAULA, 2016; LIMA et al., 2019). A busca por conhecimento sobre este híbrido, no sentido de desenvolvimento de

pesquisas para conhecer outros usos como a fabricação de painéis e laminados (GONÇALEZ et al., 2014), energia (carvão vegetal) (SILVA; ATAÍDE, 2019) e elemento absorvente (carvão ativado)(OLIVEIRA; PEREIRA; ATAÍDE, 2022), vem crescendo na academia.

As propriedades tecnológicas da madeira do clone *E. urophylla* x *E. grandis* com cinco anos de idade para uso estrutural foram avaliadas por Serenine Junior et al. (2019). Com base nos resultados obtidos, a densidade básica média da madeira foi de 0,44 g/cm³ e densidade aparente média de 0,53 g/cm³. Dessa forma, a madeira juvenil do clone testado foi considerada como um material de média densidade. Por meio do ensaio de compressão paralela às fibras, obteve-se o módulo de elasticidade igual a 10.549 MPa e a resistência, 42,86 MPa para teor de umidade de 12%. Sendo assim, os autores concluíram que o clone *E. urophylla* x *E. grandis* pode ser utilizado em estruturas de pequeno e médio porte.

Nesse contexto, Moritani e Calil Junior (2019) destacam que o melhor desempenho estrutural de uma peça de madeira depende da caracterização da espécie. Na pesquisa realizada pelos autores, a caracterização da madeira do clone *E. urophylla* x *E. grandis* foi pela classificação visual e mecânica do material. A classificação visual foi realizada com base na revisão da Norma Argentina IRAM 9662-2: 2013. Já a classificação mecânica foi feita por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos. Observou-se discrepância entre os valores de resistência ao cisalhamento para os métodos de ensaios aplicados e a importância do uso da caracterização de peças estruturais para madeiras de florestas plantadas.

No estudo de Pereira e Calil Junior (2019), a rigidez de um painel de madeira lamelada colada cruzada (CLT) fabricado com o clone *E. urophylla* x *E. grandis* e adesivo poliuretano foi comparada à de um painel de CLT com a madeira da espécie *Pinus taeda* e o adesivo melamina-ureia-formaldeído. Verificaram que os painéis apresentaram resistência e rigidez adequadas para uso estrutural, e o painel do clone *E. urophylla* x *E. grandis* obteve resultados mais satisfatórios do que o painel *Pinus taeda*.

A espessura das linhas de cola de peças de MLC fabricadas com *E. urophylla* x *E. grandis* foi medida por Oliveira et al. (2020), com o objetivo de verificar a relação entre elas e a densidade aparente, os vasos e raios da madeira. De acordo com o estudo, observou-se que a estrutura anatômica da madeira permite boa penetração e

houve uma interação significativa entre a espessura da linha de cola e a densidade aparente.

4.3 HISTÓRIA E APLICAÇÃO DA MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC)

A técnica de colagem de peças de madeira para a execução de elementos estruturais é utilizada há mais de 100 anos e teve origem na Alemanha. A primeira patente do processo de produção em vigas lameladas coladas retas foi obtida em 1901, pelo mestre carpinteiro Otto Karl Freidrich Hetzer (1846-1911), que utilizou um adesivo a base de caseína, produto derivado do leite, para substituir as ligações metálicas de braçadeiras e parafusos (KLIPPEL, 2014). Em 1906, Otto Hetzer recebeu a patente pela construção de peças lameladas coladas em formato curvo. As primeiras obras de grande porte, como coberturas de escolas e fábricas e estruturas de pontes, que adotaram a MLC foram executadas ainda no início do século XX (RHUDE, 1996).

Durante a segunda Guerra Mundial, houve um aumento no emprego de construções em madeira, ocasionadas pelas restrições no fornecimento de aço. Na mesma época, ocorreu o avanço no estudo de adesivos sintéticos que poderiam ser aplicados na colagem da madeira (FREAS, 1949). Tendo em vista o cenário favorável, observou-se um desenvolvimento considerável na utilização de MLC nas edificações do Continente Europeu (SENA-CRUZ et al., 2013).

Na década de 1930, o arquiteto e engenheiro alemão Max Hannisch levou a tecnologia de fabricação da MLC para os Estados Unidos. Em 1934, o Laboratório de Produtos Florestais inaugurou um ginásio em Peshigo, no estado de Wisconsin, com pórticos de 19,5 metros de vão em elementos curvos de MLC (Figura 2) (MITCHELL, 2007). Com o desenvolvimento de estudos relacionados a essa tecnologia, comprovando sua confiabilidade estrutural e a divulgação de vantagens como o alcance de grandes vãos, várias indústrias iniciaram a produção desse elemento. Na década de 1960, os pesquisadores se reuniram para elaborar a primeira norma com o objetivo de apresentar as diretrizes de produção da MLC (LOSS; TANNERT; TESFAMARIAN, 2018).

Figura 2 - Ginásio em Pesthigo, no estado de Wisconsin, com pórticos de 19,5 metros de vão em elementos curvos de MLC.



Fonte: MITCHELL, 2007

No Brasil, a primeira fábrica de produtos de MLC foi fundada em 1934, no Paraná, com conhecimento trazido por imigrantes alemães. Outras empresas foram instaladas, posteriormente, na Região Sul. Na década de 60, a primeira fábrica da Região Sudeste foi instalada em São Paulo (PAULI; AZAMBUJA; OLIVEIRA NETO, 2021). De acordo com Leite, Santos e Valle (2017), existem sete indústrias no País atualmente, sendo uma localizada em Goiás, duas em São Paulo, duas no Paraná, uma em Santa Catarina e uma no Rio Grande do Sul.

Na Europa e em países como Estados Unidos e Canadá, a crescente aplicação da MLC se deve ao surgimento da necessidade de emprego de madeira de reflorestamento, em particular do gênero *Pinus*, em consonância com o desenvolvimento de adesivos sintéticos (MIRSKI et al., 2020; BOWERS et al., 2017). As coníferas são amplamente empregadas na produção de MLC por apresentarem melhor penetração e interação com os adesivos (KONNERTH et al., 2016). Entretanto, o elemento colado pode ser produzido a partir de diversas espécies de madeira, dentre coníferas e folhosas, uma vez que algumas espécies possuem propriedades físicas e químicas favoráveis à colagem e que garantem um produto de qualidade (PURBA et al, 2022; MOHAMAD; RAZLAN; AHMAD, 2011)

No Brasil, as madeiras de reflorestamento, em particular as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, têm sido empregadas na produção de lamelas para MLC. Os estudos sobre as propriedades físicas e mecânicas desses gêneros permitem conhecer seu comportamento, pela aplicação de adesivos. Icimoto et al. (2016) investigaram a

influência do número de lâminas em relação ao módulo de elasticidade e ao módulo de ruptura da espécie *Pinus oocarpa*. Foram produzidos corpos de prova com 4, 6 e 8 lamelas. Pelos resultados obtidos, não houve influência do número de lamelas na resistência.

O efeito da colagem sobre a delaminação e a resistência ao cisalhamento de vigas de MLC, com *Pinus pinaster*, foi estudado, empregando diferentes tipos de adesivos (MARTINS; DIAS; CRUZ, 2019). A quantidade de adesivo utilizada e a pressão de colagem foram consideradas como principais variáveis. Os adesivos estudados foram; Fenol-Resorcinol-Formaldeído (FRF), Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF), Emulsão-Polímero-Isocianato (EPI) e Poliuretano Monocomponente (1C - PUR).

Os resultados mostraram que houve um excelente desempenho do adesivo PRF. Os adesivos MUF, EPI e 1C-PUR apresentaram bom desempenho de colagem, desde que seja aplicado *primer* (PR). A resistência ao cisalhamento não foi influenciada significativamente pelo tipo de adesivo. Martins, Dias e Crus (2019) destacaram que a maioria das tecnologias desenvolvidas para a industrialização de estruturas de madeira é direcionada para o emprego de coníferas como matéria-prima.

Entretanto, estudos utilizando o eucalipto têm mostrado resultados satisfatórios desta espécie para elementos estruturais de MLC. Petruski et al. (2016) avaliaram o comportamento estrutural de pórticos fabricados a partir de tábuas coladas, empregando madeira de *Eucalyptus* sp. e adesivo resorcinol-formaldeído. Considerando-se os critérios de resistência empregados, as estruturas apresentaram bons resultados.

As propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus* sp. foram investigadas por Segundinho et al. (2018a) com o objetivo de produzir elementos de MLC colados com adesivos à base de resorcinol-fenol-formaldeído (RFF) e poliuretano (PUR). A partir dos resultados obtidos, concluíram que a madeira de *Eucalyptus* sp. associada ao adesivo RFF possui potencial para a fabricação de MLC, com aplicação em ambiente externo.

Além disso, existem estudos desenvolvidos com o objetivo de empregar madeiras existentes na floresta amazônica e outras espécies tropicais comuns no País. Zangiácomo et al. (2017) fizeram uma pesquisa, com envira branca (*Xylopia* sp),

cambará (*Erismia uncinatum*), castanheira (*Bertholletia excelsa*) e cedrinho (*Erismia* sp.). Nesse estudo, ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas das peças estruturais foram realizados e concluíram que o cedrinho apresentou o melhor desempenho, independente do adesivo empregado. Isto ocorreu pelas características mecânicas da madeira, em particular a densidade ($0,62 \text{ g/cm}^3$), que está dentro da faixa adequada ($0,5$ a $0,75 \text{ g/cm}^3$) para a produção de elementos colados. Além disso, a madeira apresentou boa penetração dos adesivos empregados. Resultados similares foram encontrados por Santiago et al. (2018) para a espécie *Erismia uncinatum* (cedrinho) colada com adesivo à base de tanino, extraído de cascas de eucalipto.

Contudo, no processo, a seleção dos adesivos utilizados na fabricação do elemento estrutural de madeira depende das condições do ambiente onde este será empregado e de sua exposição (KOMARIAH et al., 2015). Os adesivos usualmente utilizados na fabricação de MLC no Brasil são os poliuretanos e os à base de resorcinol, com cura à temperatura ambiente. Estes adesivos possuem alta resistência à umidade, o que permite sua aplicação em meio externo (RAMFUL, 2018).

Nesse contexto, o processo produtivo deve apresentar um controle de qualidade rigoroso, que englobe as matérias-primas aplicadas (espécies de madeira e adesivos). Apesar disso, os elementos estruturais de madeira colada apresentam certa variabilidade nas propriedades mecânicas inerentes ao próprio material empregado (FARIA et al., 2020). O controle do processo de fabricação passa pela classificação visual e mecânica das peças de madeira. Segundo Terezo et al. (2021), a classificação visual possibilita a avaliação da qualidade visual, por meio da verificação da quantidade de defeitos, além do nível de densidade da madeira. A classificação mecânica pode ser por meio de ensaios não-destrutivos de flexão estática com o objetivo de estimar a resistência mecânica a partir da rigidez à flexão dos elementos (BALASSO et al., 2021).

A classificação permite definir a localização das peças de acordo com a sua resistência. As lamelas com valores mais altos de módulo de elasticidade (MOE) devem ser colocadas na parte externa (camadas inferior e superior) e as lamelas com um baixo valor de MOE devem ser posicionadas próximo à linha neutra (camada central) (MASCIA et al., 2018). Esse processo permite maior aproveitamento de peças

de madeira, quando é feito o emprego de peças de menor qualidade em zonas menos solicitadas e tábuas de maior resistência em zonas mais solicitadas (LESTARI et al., 2018).

O uso de peças compostas de madeira apresenta características que permitem seu emprego em vários tipos de construções, garantindo maior aproveitamento do material e possibilitando atingir grandes vãos (ICIMOTO et al., 2016). A MLC pode ser aplicada em estruturas de cobertura, em pontes, torres de transmissão de energia, edifícios, estruturas com detalhes decorativos planos ou em relevos. Isto é possível pela capacidade do elemento estrutural de se adaptar a diferentes formas e apresentar alta resistência aos esforços (MORIN-BERNARD et al., 2020; DIESTCH; TANNERT, 2015).

4.4 ADESIVOS E SUA INFLUÊNCIA NA ADESÃO

Além das lamelas de madeira, o outro componente que determina a qualidade da MLC é o adesivo empregado no processo de fabricação. Este processo envolve três elementos básicos, adesivo, aderente e adesão. O adesivo é um material com propriedades aderentes que, no caso da colagem de madeira para fins estruturais, deve apresentar características que garantam a união resistente, estável e durável (BIANCHE et al., 2017). Os aderentes ou substratos são os materiais sólidos capazes de se ligarem por meio de adesivos. A adesão é um fenômeno de interação físico-química das superfícies sólidas, que leva ao processo de colagem, em geral, irreversível (KOLLMAN, 2012).

As propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira interferem diretamente no mecanismo de adesão e na formação de junta colada de qualidade, já que influenciam a habilidade do adesivo de aderir às suas superfícies (GONÇALVES et al., 2019). Entre os fatores que afetam a qualidade de adesão da madeira, destacam-se as propriedades anatômicas, principalmente, às variações de dimensões, tamanho e disposição dos elementos celulares. Deve-se observar ainda que estes estão relacionados com a porosidade e a permeabilidade da madeira (FOLLRICH et al., 2007).

A densidade da madeira possui uma relação inversamente proporcional à porosidade e à atuação de penetração de adesivos na estrutura anatômica. Em geral, madeiras que possuem alta densidade e baixa porosidade são mais difíceis de serem

coladas, já que estas apresentam paredes celulares mais espessas e conseqüentemente, lumens de diâmetros menores (BIANCHE et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2020). Estas características levam à baixa penetração do adesivo na estrutura lenhosa, exigindo uma pressão muito maior para uma colagem eficiente. Em contrapartida, madeiras de baixa densidade e porosidade elevada proporcionam maior penetração (PIZZI, 1994; FRIHART; HUNT, 2010).

Neste contexto, Boa et al. (2014) investigaram a colagem a frio da madeira de eucalipto em diferentes gramaturas (150, 200, 250, 300 e 350 g.m⁻²). Após a determinação da densidade básica das peças, estas foram divididas em dois grupos, o primeiro com densidades iguais ou inferiores a 0,65 g.cm⁻³ e o segundo com densidades superiores a 0,65 g.cm⁻³. Os resultados mostraram que a madeira com menor densidade apresentou colagem mais eficiente, destacando-se que a gramatura de 350 g.m⁻² resultou em melhores valores de resistência na linha de cola (13,12 MPa).

Além das propriedades anatômicas, o teor de umidade também exerce influência sobre a colagem, visto que tal variação está relacionada à retratibilidade volumétrica da madeira (contração e inchamento), o que provoca deformações excessivas e, conseqüentemente, a perda de eficiência da linha de cola (SEGUNDINHO et al., 2018b). Outro estudo avaliou a influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de duas espécies comerciais de eucalipto, e verificou-se que o comportamento das juntas coladas pode variar de acordo com a espécie empregada (MOTTA; OLIVEIRA; ALVES, 2012).

Além dos fatores inerentes aos materiais das lamelas envolvidos no processo, a colagem também está sob influência do tipo de adesivo, do tempo de cura, da gramatura e da pressão de colagem (NASCIMENTO; GARCIA; DELLA LUCIA, 2013). Quanto ao tempo de prensagem, Iwakiri et al. (2014) mencionam que deve ser considerado um mínimo necessário para que as funções de mobilidade do adesivo na interface com a madeira sejam ativadas e, assim, ocorra sua secagem e cura.

De acordo com Fonte e Trianoski (2015), a resistência do elemento em MLC apresenta alteração considerável quando a gramatura aplicada é insuficiente ou em excesso. Gramaturas muito baixas levam à baixa resistência pela aderência e à ancoragem insuficientes, e gramaturas altas implicam em gasto excessivo de adesivo e a uma linha de cola muito espessa (IWAKIRI et al., 2014).

A definição do tipo de adesivo é um fator essencial na fabricação de peças estruturais de madeira colada e está condicionada à aplicação, à espécie da madeira, ao tratamento preservativo aplicado e ao método de fabricação. Alguns adesivos apresentam redução de vida útil da adesão entre as peças, quando aplicados em ambientes externos, em que a estrutura tenha contato direto com chuva e outras variações climáticas (KRŽIŠNIK et al., 2020). Portanto, a fabricação de elementos estruturais de MLC está condicionada ao uso de adesivos específicos e resistentes às intempéries (SEGUNDINHO et al., 2015).

A Norma Chilena NCh2148.cR (2010) utiliza três classes de uso nas quais os elementos estruturais podem se enquadrar e que são definidas de acordo com o nível de exposição da estrutura no ambiente. A classe de uso I se aplica a ambientes internos que estejam protegidos da chuva, de altas temperaturas e de umidades elevadas. A classe de uso II considera o uso em ambientes externos cobertos, protegidos de intempéries, mas com alta teor de umidade relativa. Já a classe III, caracteriza-se pela aplicação em ambientes externos, diretamente expostos ao tempo e com temperaturas elevadas.

Em geral, os adesivos empregados na indústria são predominantemente sintéticos e apresentam como elementos principais, em sua composição, compostos derivados de petróleo, os quais apresentam excelentes propriedades de adesão, bom desempenho em ambientes com umidade e altas temperaturas e resistência a organismos xilófagos (GONÇALVES et al., 2019). Dentre os adesivos empregados na indústria madeireira, destacam-se aqueles à base de formaldeído, como a ureia, a melamina, o fenol, o resorcinol e o isocianato, além do poliacetato de vinila, utilizado na indústria moveleira (BOA et al., 2014; SEGUNDINHO et al., 2017).

4.5 NORMAS INTERNACIONAIS APLICADAS A MLC

De acordo com a Organização Internacional de Normatização (*International Organization for Standardization*) – ISO (2020), as normas são documentos que trazem requisitos, especificações, diretrizes ou características que são usadas de forma a garantir que materiais, produtos, processos e serviços sejam adequados para a sua finalidade. Cumprir os requisitos mínimos estipulados por normas ou padrões, sejam nacionais ou internacionais, significa dizer que o produto é seguro, confiável e de boa qualidade.

Além disso, Machado (2004) menciona que a indústria de madeira deverá garantir que os produtos colocados no mercado obedeçam aos requisitos impostos pela normalização e regulamentação aplicável, e a indústria da construção deverá efetuar as especificações do produto pretendido obedecendo a critérios concretos, definidos por essa mesma normalização. Ao atenderem às normas e aos padrões, os produtos deverão cumprir requisitos mínimos essenciais, como; resistência mecânica e estabilidade, segurança contra incêndios, higiene, saúde e ambiente, segurança na utilização, proteção contra o ruído, economia de energia e retenção de calor.

Segundo a *American National Standards Institute* - ANSI A190.1-2012 (2013), a MLC é um produto de madeira projetado, que nem sempre pode ser testado e, portanto, requer precisão em todos os estágios de fabricação para garantir o controle de qualidade. O *American Institute of Timber Construction* – AITC (2009) afirma que a qualidade é definida por um conjunto de ações pelas quais um fabricante garante que materiais, métodos, mão de obra e produto atendam aos requisitos preconizados em norma.

Considerando-se que não existem normas brasileiras que abordem o assunto, é necessário aplicar na fabricação de MLC normas internacionais, dentre estas pode-se citar a ANSI A190.1-2012 (ANSI, 2013), EN 386 (EUROPEAN STANDARD, 2001) e NCh2148.cR (INN, 2010). De acordo com Calil Neto (2011), as designações descritas nas normas citadas seguem diretrizes bastante semelhantes. Destaca-se a norma americana ANSI A190.1-2012 que descreve minuciosamente os métodos de ensaios que devem ser adotados para o controle de qualidade.

A ANSI A190.1-2012 (ANSI, 2013), foi iniciada pelo AITC, e desenvolvida de acordo com as disposições do ANSI como uma revisão da AITC A190.1-2007. Esta norma apresenta os requisitos necessários para a produção de MLC, incluindo tolerâncias referentes às dimensões, características da madeira serrada e dos adesivos, graus de aparência e fabricação. Também descreve o sistema de controle de qualidade necessário para o fabricante, incluindo a especificação do processo, controle diário, funções de uma agência de inspeção credenciada e marcação do produto.

A norma europeia EN 386 (2001) apresenta os requisitos de desempenho e de produção para a MLC. O principal objetivo é obter ligações confiáveis e duráveis, para que os elementos laminados mantenham sua integridade durante toda a vida útil da

estrutura. A norma é aplicável a produtos com espessura de laminação acabada menor ou igual a 45 mm. Esta apresenta a metodologia para a realização do ensaio de delaminação e de cisalhamento paralelo às fibras da madeira, na linha de cola. Ressalta-se que a EN 386 (2001) foi desenvolvida para a aplicação em madeiras de coníferas, mas pode ser aplicada para folhosas, desde que haja informações disponíveis sobre o material que permitam sua colagem.

A norma chilena NCh2148.cR (INN, 2010) trata dos requisitos que devem ser atendidos na produção de MLC, incluindo madeira, adesivo, processo de laminação, tamanhos e tolerâncias. Além disso, estabelece os procedimentos de inspeção e teste, o processo de controle de qualidade a ser desenvolvido pelo fabricante e as funções do responsável pela inspeção e pelo controle de qualidade.

Quanto as pesquisas relacionadas desta tese, é essencial a realização de ensaios preconizados por normas para caracterizar os materiais empregados na fabricação de MLC. A ASTM D198:15 (ASTM, 2018) apresenta métodos de ensaios para avaliar a resistência à flexão, à compressão, à tração e à torção e à rigidez de produtos de madeira e seus derivados. Também é apresentado um ensaio de resistência para avaliar a rigidez ao cisalhamento.

Em particular a melhora no desempenho da MLC depende da classificação da rigidez das lamelas utilizadas no elemento. Para este fim, podem ser aplicadas normas de classificação visual e mecânica (CARREIRA; DIAS, 2005). Sendo assim, a classificação tem seu início com a aplicação de métodos não destrutivos, como a inspeção visual, que tem como objetivo examinar algumas propriedades intrínsecas da madeira, dentre estas a inclinação das fibras, nós, empenamento, anéis de crescimento, encurvamento, racha anelar e fenda (BOURSCHEID et al., 2017). A identificação destas características permite que a madeira seja distribuída em lotes de uso estrutural (FIORELLI; DIAS; COIADO, 2009).

Quanto à classificação mecânica e ao controle de qualidade da madeira, os módulos de elasticidade e de ruptura (MOE e MOR) são amplamente empregados. Estes podem ser obtidos por meio de métodos dinâmicos de excitação por impulso e varredura por frequência. Tais procedimentos de caracterização são não-destrutivos, evitando desperdício de material com a retirada de corpos de prova. Tendo em vista sua importância, estes procedimentos de caracterização não-destrutivos são apresentados na norma ASTM E1876 (PIZZOL; MANTILLA; CARRASCO, 2017).

No estudo de Carrasco et al. (2017), o método de excitação por impulso foi aplicado em 29 espécies de madeira brasileiras, com objetivo de determinar os respectivos módulos elásticos dinâmicos e compará-los com as características mecânicas elásticas apresentadas pela norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Os resultados obtidos mostraram que a técnica é eficiente já que, para estimativa do módulo de elasticidade, apresentou uma alta correlação entre as variáveis estudadas.

Os ensaios não destrutivos realizados por Segundinho et al. (2018b) utilizaram técnicas de vibração transversal livre e longitudinal com objetivo de caracterizar a madeira de *Toona ciliata* M. (cedro australiano). Os ensaios foram embasados nas normas ASTM E - 1876 (2007) e ASTM C - 215 (2008). Também foram realizados ensaios destrutivos com objetivo de comparar os valores obtidos. Os pesquisadores concluíram que o ensaio de vibração longitudinal é o método mais adequado para obtenção do módulo de elasticidade longitudinal aparente.

A obtenção dos módulos de ruptura e elasticidade (MOR e MOE) comumente é feita com o ensaio de flexão estática, embasado na ASTM D198 (ASTM, 2018). Faria et al. (2019) empregaram este ensaio no estudo do comportamento mecânico de MLC de *Toona ciliata* produzida com adesivo poliuretano vegetal. O ensaio de flexão estática de acordo com a ASTM D198 também foi empregado na pesquisa de Peixoto, Soriano e Pellis (2019), com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural de vigas de MLC com reforço de barras de aço.

4.6 MODELAGEM NUMÉRICA

Com o avanço das diversas áreas das engenharias, em projetos cada vez mais complexos, surgiu a necessidade de aplicação de modelos numéricos capazes de proporcionar previsões realistas do comportamento das estruturas (CASTELLAZZI et al., 2017). Estes procedimentos são essenciais para garantir a otimização e a confiabilidade estrutural, pois são desenvolvidos com o objetivo de fornecer subsídios para a melhor compreensão da estrutura, em termos de geometria, propriedades dos materiais, carregamentos e verificação de possíveis falhas (CASTRO; SOUZA; SARMANHO, 2019).

De acordo com Vêras (2018), pode-se citar como procedimentos de modelagem numérica, aplicados em análise estrutural: o método das diferenças finitas (MDF), o método dos elementos de contorno (MEC) e o método dos elementos finitos

(MEF), sendo este último o mais difundido atualmente. Com o desenvolvimento de computadores cada vez mais eficientes e de *softwares* com interfaces intuitivas, estudos de caráter numérico têm ocorrido com maior frequência. Dentre as ferramentas disponíveis para a modelagem numérica destacam-se *softwares* como SAP2000, ANSYS e ABAQUS. A maioria destes foi desenvolvida com base no MEF e, para sua aquisição é indispensável considerar seu alto custo. Portanto, é necessário considerar o material e os fins de utilização estrutural antes de se definir o programa mais adequado (CALIL NETO et al., 2017).

4.6.1 Método dos elementos finitos

Dentre as técnicas de modelagem numérica, amplamente utilizadas na engenharia, destaca-se o método dos elementos finitos (MEF) (SILVA, 2017). Os primeiros conceitos do MEF surgiram no século XVIII, quando o matemático Gauss Legendre propôs utilizar funções de aproximação para solução de problemas. Outros estudiosos desenvolveram teorias e técnicas embasadas nos conceitos de Gauss. O método propriamente dito foi desenvolvido por Clough, na década de 1960, para a aplicação em projetos de aeronaves (RAO, 2018). O avanço tecnológico dos computadores permitiu sua popularização nos anos 1980, proporcionando a análise de estruturas arbitrárias, constituídas por vários materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento (AZEVEDO, 2003).

O método tem como princípio a discretização do meio contínuo em um número finito e razoável de elementos, denominados subdomínios, que mantém as propriedades de quem os originou, e encontra uma solução aproximada, resolvendo um grande sistema de equações lineares (ALVES FILHO, 2018). Essa subdivisão de elementos é denominada malha, a qual é composta por arestas e pontos nodais (TRENTO et al., 2016). Neste contexto, uma função que obedeça às condições para todo o domínio é representada por funções estabelecidas em cada elemento (arestas e pontos nodais), levando a uma solução aproximada que reduza a um erro mínimo (LOTTI et al., 2006; MONTANARO; PALLISTER, 2016).

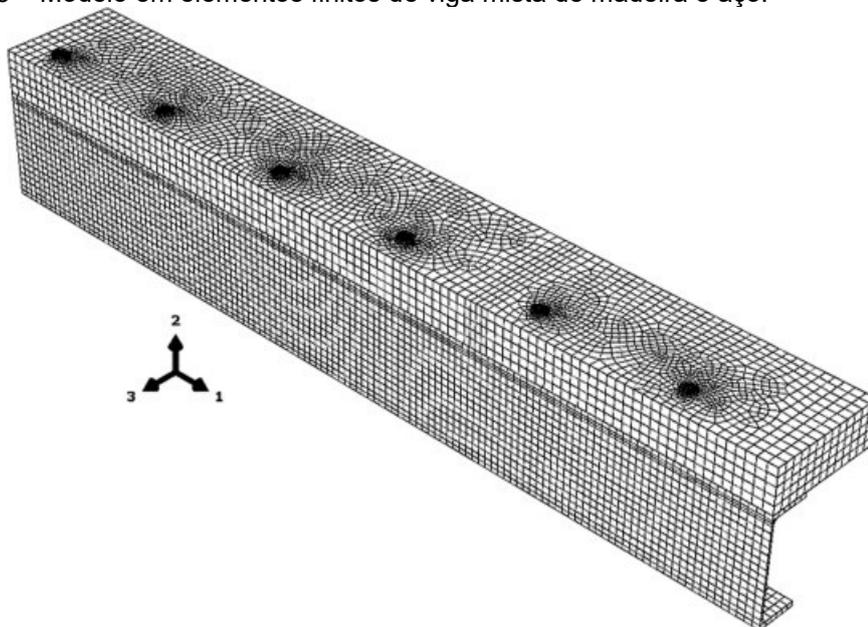
Segundo Azevedo (2003), na engenharia estrutural, o MEF permite a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a esforços externos. Além disso, o método possibilita uma série de

análises e modificações na estrutura, com o objetivo de se encontrar a melhor solução estrutural e econômica dentro das normas vigentes.

Na análise estrutural, o MEF é amplamente empregado, principalmente quanto ao estudo de concreto armado e aço. Para a madeira, a utilização do método tem apresentado um crescimento nos últimos anos. Martins, Munaiar Neto e Calil Neto (2015) avaliaram o comportamento térmico e mecânico de vigas de MLC, quando expostas ao fogo, por meio do MEF. Os pesquisadores desenvolveram um modelo térmico, avaliando apenas o comportamento com o aumento da temperatura.

Tran et al. (2018) desenvolveram um modelo tridimensional para simular o comportamento à flexão de vigas mistas de madeira e aço e madeira e concreto (Figura 3). Segundo os autores, o comportamento de vigas mistas que incluem a madeira é bastante complexo, tendo em vista as características distintas de cada material. A modelagem realizada no *software* Abaqus foi validada pela comparação com dados experimentais, permitindo afirmar que o modelo é capaz de prever a resposta estrutural não-linear das vigas mistas, considerando-se as características estudadas.

Figura 3 – Modelo em elementos finitos de viga mista de madeira e aço.



Autor: Tran et al. (2018).

O MEF foi utilizado por Shakimon et al. (2016) no desenvolvimento de um modelo numérico para simular a flexão em vigas de MLC bi-apoiadas, fabricadas com espécies tropicais de densidade alta (830 kg/m^3 a 980 kg/m^3). Segundo os autores, a

modelagem foi capaz de representar os resultados experimentais obtidos por meio de ensaios.

Na análise de emendas de vigas de MLC aplicadas em grandes vãos de ponte em formato de arco, Cepelka e Malo (2017) utilizaram modelos em MEF. O objetivo da pesquisa foi avaliar a resistência à flexão da emenda das vigas, usando hastes de rosca longa e acopladores com argamassa. As características de flexão das conexões das emendas foram estudadas usando protótipos de emendas de vigas de madeira. O modelo desenvolvido considerou a madeira como material isotrópico e os resultados foram comparados aos valores obtidos pelos ensaios no protótipo. Concluíram que o modelo numérico representou, com boa precisão, o comportamento flexural da emenda.

No estudo de Bileski, De Conti e Deus (2019), o comportamento da madeira de *Corymbia citriodora* ao cisalhamento, no plano de ortotropia longitudinal-radial (LR), foi analisado por meio da simulação numérica pelo MEF. O modelo elaborado foi adequado para representar as tensões e deslocamentos referentes ao cisalhamento no plano de interesse.

Em uma avaliação sobre fibras sintéticas empregadas como reforço em vigas de MLC, os resultados experimentais foram comparados aos resultados numéricos por elementos finitos. As comparações entre as vigas e os modelos foram realizadas antes e depois da aplicação de reforço. O reforço garantiu aumento de rigidez (MOE), aumento de resistência (MOR), além de mudar o modo de ruptura frágil das vigas para dúctil, conferindo-lhes maior segurança às mesmas. Os resultados obtidos indicam aproximações admissíveis de deslocamentos verticais e tensões normais pela flexão, e validam os modelos estudados, permitindo utilizá-los em projetos de reforço estrutural (VILELA; MASCIA; DONADON, 2019).

Simulação numérica foi aplicado em estudo desenvolvido por Molina et al. (2019) para vigas mistas de madeira e concreto em pontes. As vigas estudadas foram executadas em *Eucalyptus citriodora* e concreto de média resistência, com conectores em barras de aço comuns com um diâmetro de 12,5 mm. Os modelos numéricos permitiram, com razoável aproximação, avaliar as distribuições de tensão nas vigas mistas, testadas experimentalmente.

O comportamento da madeira foi avaliado, com MEF, sob condições de carregamento adversas. Três modelos foram desenvolvidos por Bouhala et al. (2020),

o primeiro para simular o ensaio de compressão/tração, outro para o ensaio de cisalhamento duplo *push-out* e o último para o ensaio de flexão em quatro pontos. De acordo com o estudo, os modelos numéricos propostos permitem projetar estruturas de madeira com diferentes graus de complexidade geométrica. Além disso, os ensaios padronizados, como os de flexão de quatro pontos em vigas de madeira, podem ser estudados com facilidade no modelo, para isso, é necessário alterar os parâmetros e as variáveis estudadas.

4.6.2 Structural analysis program - SAP2000

O MEF é a base para a maioria dos *softwares* comerciais que podem ser empregados para a modelagem numérica, dentre estes destaca-se o *Structural Analysis Program - SAP2000*. Este pode ser utilizado em diversas áreas, como infraestrutura de transporte, obras industriais e geração de energia (JUSTO, 2001). Entretanto, sua configuração atual se deve a adaptações para seu uso na engenharia estrutural, para análise linear e não-linear, criando uma série de facilidades para esta área de aplicação e, tornando assim, os seus “menus” e características mais intuitivos (GIAMMONA; RYAN; DAO, 2015).

O SAP2000 possui uma listagem de materiais na qual, depois de escolhido um componente, é possível definir as principais características desse, como coeficiente de Poisson ou Módulo de elasticidade (JUSTO, 2001). O programa permite o estabelecimento dos parâmetros para cada elemento (concreto, madeira, aço) e possibilita a modificação de dimensões da seção por meio de um “menu” com várias opções para a definição das geometrias dos elementos que se deseja modelar (MELO 2016). Em relação à discretização da estrutura, é possível refinar a malha nos locais onde os esforços serão mais significativos e adotar uma malha mais espaçada nos locais em que os esforços são menos significativos (RECALDE et al., 2015).

O *software* pode ser aplicado para a modelagem de elementos estruturais como vigas, pórticos, lajes, cascas e treliças espaciais. Com os recursos de código de projeto integrado, podem ser gerados carregamentos móveis, esforços dinâmicos, efeitos de gradiente de temperatura e pressões e ainda analisar esforços pelos deslocamentos (MELO, 2016).

O SAP2000 foi utilizado por Mascia et al. (2013) para a modelagem em elementos finitos do comportamento mecânico de vigas mistas de madeira e concreto.

O estudo embasou-se na determinação dos deslocamentos verticais. O modelo numérico foi comparado aos resultados experimentais e concluiu-se que a formulação proposta foi eficiente na representação do comportamento estrutural das vigas.

A análise estrutural de uma ponte executada em MLC e concreto foi modelada numericamente no *software* SAP2000 por Mišulić, Manojlović e Rašeta (2016). A estrutura lamelada colada (arcos e vigas) foi simulada como elementos de viga, enquanto a laje de concreto foi modelada como elemento de casca (Figura 4). Com o *software* foi possível prever os efeitos de cargas de tráfego e esforços sísmicos.

Figura 4 - Modelo de ponte: a) Ponte Montmorency Québec, b) Modelo de ponte analisado.



Autor: Mišulić, Manojlović e Rašeta , 2016.

No estudo de Fernandes e Branco (2018), a modelagem numérica de malhas de madeira foi no SAP2000. Os elementos de malha foram inseridos no *software* como barras unidas por nós, associando-se às propriedades da madeira. Verificou-se que a modelagem foi capaz de representar com boa aproximação a construção existente. O modelo apresentou um comportamento relativamente homogêneo em relação às tensões, estas apresentaram-se mais elevadas nos vértices.

O SAP2000 foi aplicado no estudo de edifícios com estrutura de madeira de múltiplos andares em áreas sísmicas por Di Cesare et al. (2019). O modelo foi desenvolvido com uma combinação de elementos elásticos com molas rotacionais e lineares agrupadas. Os pesquisadores concluíram que os resultados numéricos da análise dinâmica não linear estão de acordo com a resposta experimental sísmica global e local do modelo.

5 REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos**: A base da tecnologia CAE. 6. ed. São Paulo: Érica, 2018.

AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR WOOD PRODUCTS. **AITC 115**: Standard for manufacture lumber for use in structural glued laminated timber. Philadelphia, 2009.

AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR WOOD PRODUCTS. **AITC A190**: Structural Glued Laminated Timber. Philadelphia, 2007.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A190.1-2012**: Standard for wood products – Structural glued laminated timber. Tacoma, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Philadelphia, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM E1876 – 07**: Standard Test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Philadelphia, 2007.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM C215 – 08**: Standard Test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. Philadelphia, 2010.

ARAÚJO, M. J.; DIAS, D. C.; SCARPINATI, E. A.; PAULA, R. C. Número de repetições, de plantas por parcela e de avaliações para testes clonais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 10, p. 923-931, 2015.

ARAÚJO, V. A.; GARCIA, J. N.; BARBOSA, J. C.; GAVA, M; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; ROCCO LAHR, F. A.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L. Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 189-200, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro: ABNT. 1997.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. 1 ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. 258 p.

BALASSO, M.; Hunt, M.; Jacobs, A.; O'Reilly-Wapstra, J. Development of non-destructive-testing based selection and grading strategies for plantation *Eucalyptus Nitens* sawn boards. **Forests**, v. 12, n. 3, p. 343, 2021.
<https://doi.org/10.3390/f12030343>

BARROS, D. L.; REZENDE, F. A.; CAMPOS, A. T. Production of *Eucalyptus urograndis* plants cultivated with activated biochar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, p. 1-6, 2019.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p 1-9, 2017.

BILESKI, L. R.; DE CONTI, C.; DEUS, P. R.; Modelagem numérica da madeira *Corymbia citriodora* ao ensaio de cisalhamento iosipescu. **Ciência da Madeira**, v. 10, n. 2, p. 150-157, 2019.

BOA, A. N.; GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C. Resíduos madeireiros de eucalipto colados com resina ureia formaldeído à temperatura ambiente. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 102, p. 279-288, 2014.

BOUHALA, I.; FIORELLI, D; MAKRADI, A.; BELOUETTAR, S.; SOTAYO, A.; BRADLEY, D. F.; GUAN, Z. Advanced numerical investigation on adhesive free timber structures. **Composite Structures**, v. 246, 9 p., 2020.

BOURSCHEID, C. B.; ROSA, T. O.; STUPP, A. M.; VIEIRA, H. C.; TEREZO, R. F.; CUNHA, A. B. Influência da classificação visual de defeitos na rigidez de lâminas de *Cryptomeria japonica* e *Cupressus lusitanica* para produção de madeira lamelada colada. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 2, 2017, BUENOS AIRES, **Anais** [...]. Buenos Aires: Universidad Nacional Noroeste, 2017. p. 1-7.

BOWERS, T.; PUETTMANN, M. E.; GANGULY, I.; EASTIN, I. Cradle-to-gate life-cycle impact analysis of glued-laminated (glulam) timber: Environmental impacts from glulam produced in the US Pacific northwest and southeast. **Forest Products Journal**, v. 67, n. 5-6, p. 368-380, 2017. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-17-00008>

CALIL NETO, C. **Madeira Lamelada Colada (MLC)**: Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo. 2011. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALIL NETO, C.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C; ROCCO LAHR, F. A. Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em X em corpos de prova de MLC com madeiras do tipo *Eucalypto urograndis*. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Visual grading of softwoods: analysis of application of the North American method to *Pinus* sp. species planted in Brazil. **Scientia Forestalis**, n. 67, p. 78-87, 2005.

CARRASCO, E. V. M.; VARGAS, C. B.; SOUZA, M F.; MANTILLA, J. N. R. Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Revista Matéria**, v. 22, p. 1-12, 2017.

CASTELLAZZI, G.; D'ALTRI, A. M.; MIRANDA, S.; UBERTINI, F. An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. **Engineering Structures**, v. 132, p. 229-248, 2017.

CASTRO, E. C.; SOUZA, F. T.; SARMANHO, A. M. C. Análise numérica de ligação parafusada semirrígida em perfis formados a frio. **For Science**, v. 7, n. 2, 2019.

CEPELKA, M.; MALO, K. A. Moment resisting splice of timber beams using long threaded rods and grout-filled couplers – Experimental results and predictive models. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 560-570, 2017.

DI CESARE, A.; PONZO, F. C.; LAMARUCCIOLA, N.; NIGRO, D. Modelling of post-tensioned timber framed buildings with hysteretic bracing system: preliminary analysis. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 233, 2019.

DIESTCH, P.; TANNERT, T. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. **Construction and building materials**, v. 101, n. 2, p. 1259-1270, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.064>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **O Eucalipto**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferecia-de-tecnologia/eucalipto>. Acesso em: 07 maio 2020.

EUROPEAN STANDARDS - **EN 386**: Glued Laminated Timber: performance requirements and minimum production requirements. 2001. p. 14.

FARIA, D. L.; CRUZ, T. M.; DIAS, M. C.; DUARTE, P. J.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. Physical and mechanical behavior of glulam beams produced with rubberwood treated with preservatives. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, 2020. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044012020>

FARIA, D. L.; CRUZ, T. M.; MESQUITA JÚNIOR, L.; DUARTE, P. J.; MENDES, L.M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Number of laminae on the mechanical behavior of glued laminated timber (glulam) of *Toona ciliata* produced with vegetable polyurethane adhesive. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, p. 1-8, 2019.

FERNANDES, J. G.; BRANCO, J. M. A utilização sustentável das malhas estruturais de madeira. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 3, 2018, Coimbra, **Anais [...]**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2018. p. 1-10.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de *Pinus* sp: correlação entre resistência à tração e classificação visual. **Revista Árvore**, v. 33, n. 4, p. 741-750, 2009.

FONTE, A. P. N.; TRIANOSKI, R. Efeito da gramatura sobre a qualidade de colagem lateral da madeira de *Tectona grandis*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 14, n.3, p.224-233, 2015.

FOLLRICH, J.; TEISCHINGER, A.; GINDL, W.; MÜLLER, U. Effect of grain angle on shear strength of glued end grain to flat grain joints of defect-free softwood timber. **Wood Science and Technology**, v. 41, p. 501-509, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0136-7>

FREAS, A. D. **Studies of the strength of glued laminated wood construction**, ASTM Bulletin, 1949.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials bond formation and performance. In: **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

GIAMMONA, A. P.; RYAN, K. L.; DAO, N. D. Evaluation of assumptions used in engineering practice to model buildings isolated with triple pendulum isolators in SAP2000. **Earthquake Spectra**, v. 31, n. 2, p. 637–660, 2015.

GONÇALEZ, J. C.; SANTOS, G. L.; SILVA JUNIOR, F. G.; MARTINS, I. S.; COSTA, J. A. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81-89, 2014.

GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G. A.; PAES, J. B.; CHAVES, I. L. S.; MARTINS, R. S. F.; SOUZA, S. F.; SILVA, L. F.; OLIVEIRA, R. G. E.; OLIVEIRA, J. G. L. Eficiência da colagem em madeira de kiri japonês (*Paulownia tomentosa*). **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, p. 95-102, 2019.

GRATTAPAGLIA, D. Genômica aplicada à genética e melhoramento de *Eucalyptus* na Embrapa: 25 anos de avanços e as perspectivas para o futuro. **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2021.

HSING, T. Y.; PAULA, N. F.; PAULA, R. C. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016.

ICIMOTO, F. H.; CALIL NETO, C.; FERRO, F. S.; MACEDO, L. B.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A.; CALIL JÚNIOR, C. Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beams of *Pinus oocarpa*. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 2, p. 51-55, 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160602.05

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório 2021**, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2021.pdf>. Acesso em: 26 abr 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. **NCh2148**: Madera lamelada encolada estructural – Requisitos e inspección. Santiago. 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Benefits of standards**. Disponível em: <https://www.iso.org/benefits-of-standards.html> Acesso em: 01 maio 2020.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PRATA, J. G.; TRIANOSKI, R.; PARCEN, C. F.; CASTRO, V. G.; IWAKIRI, V. T. Características de vigas lameladas coladas

confeccionadas com madeira de teca (*Tectona grandis*). **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 269-275, 2014.

JESUS, D. S.; SILVA, J. S. Variação radial de propriedades anatômicas e físicas da madeira de eucalipto. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 1, p. 1-13, 2020.

JUSTO, R. A. E. G. **Comparação do desempenho e de funcionamento de programas comerciais (ANSYS e SAP2000) focado à análise sísmica**. 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2001.

KRŽIŠNIK, D.; GRBEC, S.; LESAR, B.; PLAVČAK, D.; ŠEGA, B.; ŠERNEK, M.; HUMAR, M. Durability and mechanical performance of differently treated glulam beams during two years of outdoor exposure. **Drvna industrija**, v. 71, n. 3, p. 243-252, 2020. <https://doi.org/10.5552/drvind.2020.1957>

KLIPPEL, M. **Fire safety of bonded structural timber elements**. 2014. 160 f. Tese (Doutorado) – Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2014.

KOLLMANN, F. F. P; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology: II wood based materials**. Springer Science & Business Media, 2012.

KOMARIAH, R. N.; HADI, Y. S.; MASSIJAYA, M. Y.; SURYANA, J. Physical-mechanical properties of glued laminated timber made from tropical small-diameter logs grown in Indonesia. **Journal Korean Wood Science Technology**, v. 43, n. 2, p. 91-98, 2015. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2015.43.2.156>

KONNERTH, J.; KLUGE, M.; SCHWEIZER, G.; MILJKOVIĆ, M.; GINDL-ALTMUTTER, W. Survey of selected adhesive bonding properties of nine European softwood and hardwood species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 6, p. 809-819, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1087-1>

LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M; VALLE, I. M. R. O uso da madeira lamelada colada no Brasil: panorama e desafios. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 2, 2017, Buenos Aires, **Anais [...]**. Buenos Aires: Universidad Nacional Noroeste, 2017. p. 1-12.

LESTARI, A. S. R. D.; HADI, Y.; HERMAWAN, D.; SANTOSO, A. The physical and mechanical properties of glulam made from pine and Jabon Woods. **Journal of Tropical Wood Science and Technology**, v. 16, p. 93-101, 2018. <https://doi.org/10.51850/jitkt.v16i1.445.g371>

LIMA, P. A. F.; DEMARCHI, J.; DA SILVA, M. F.; DE MORAES, M. D. A.; CALDAS, D. J.; JÚNIOR, C. R. S. Qualidade da madeira de eucalipto para aplicação como mourão tratado. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 509-519, 2019. <https://doi.org/10.19084/rca.17179>

LOSS, C.; TANNERT, T.; TESFAMARIAN, S. State-of-the-art review of displacement-based seismic design of timber buildings. **Construction of Building Materials**, v. 191, p. 481-497, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.205>

LOTTI, R. S. MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; LANDRE JUNIOR, J. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, v. 11, n. 2, p. 35-43, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1415-54192006000200006>

MACHADO, J. S. Produtos de madeira maciça para a construção: desafios da qualidade. **Silva Lusitana**, v. 12, n. 2, p. 203 - 212, 2004.

MADERA LAMELADA ENCOLADA ESTRUCTURAL – **NCh2148. cR2010**: Requisitos e Inspeccion, Santiago. 2010. 53 p.

MARTINS, C.; DIAS, A. M. P. G.; CRUZ, H. Bonding performance of Portuguese Maritime pine glued laminated timber. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 520-529, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.143>

MARTINS, G. C. A.; MUNAIAR NETO, J.; CALIL JUNIOR, C. Análise numérica de elementos de madeira lamelada colada em situação de incêndio. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 36, 2015, Rio de Janeiro, **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Universidad de la República, 2015. p. 1-12. Disponível em: <https://plataforma.swge.com.br/PROCEEDINGS/PDF/CILAMCE2015-0372.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2020.

MASCIA, N. T.; FORTI, N. C. S.; SORIANO, J.; NICOLAS, E. A.; FORTI, T. L. D. Study of concrete–timber composite beams using an analytical approach based on the principle of virtual work and experimental results. **Engineering Structures**, v. 46, p. 302-310, 2013.

MASCIA, N. T.; BERTOLINE, C. A. A.; BASÁGLIA, C. D.; DONADON, B. F.; Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by Vectran fibers. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 359-373, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300286>

MELO, C. E. L. **Análise Estrutural com o SAP 2000**. ResearchGate [online], 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309851471_Analise_Estrutural_com_o_SAP_2000. Acesso em: 29 abr. 2016.

MINISTÉRIO da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Florestas do Brasil em resumo 2019**, Brasília, 2019. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/publicacoes/1737-florestas-do-brasil-em-resumo-2019>. Acesso em: 26 abr. 2022.

MORIN-BERNARD, A.; BLANCHET, P.; DAGENAI, C.; ACHIM, A. Use of northern hardwoods in glued-laminated timber: A study of bondline shear strength and

resistance to moisture. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 5, p. 891-903, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01572-3>

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; CHUDA-KOWALSKA, M.; WIERUSZEWSKI, M.; KAWALERCZYK, J.; TROCIŃSKI, A. The usefulness of pine timber (*Pinus sylvestris* L.) for the production of structural elements. Part II: Strength properties of glued laminated timber. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 4029, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13184029>

MIŠULIĆ, T. K.; MANOJLOVIĆ, D.; RAŠETA, A. Seismic analysis of composite glulam-concrete arch bridge according EN 1998:1&2. In: International Conference Civil Engineering – Science and Practice, 6, 2016, Žabljak. **Anais [...]**. Žabljak: Universidad de la República, 2016. p. 537-544.

MITCHELL, B. Laminated timber arches graces WPA Gymnasium. **The Palimpsest**, v. 88, n. 2, 2007.

MOHAMAD, W. H. W.; RAZLAN, M. A.; AHMAD, Z. Bending strength properties of glued laminated timber from selected Malaysian hardwood timber. **International Journal Civil & Environmental Engineering**, v. 11, n. 4, p. 7-12, 2011.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; OLIVEIRA, D. R.; GOMES, N. B. Analytical, experimental and numerical study of timber-concrete composite beams for bridges. **Computers and Concrete**, v. 24, n. 2, p. 103-115, 2019.

MONTANARO, A. PALLISTER, S. Quantum algorithms and the finite element method. **Physics Subject Headings**, v. 93, n. 3, 2016.

MORITANI, F. Y.; CALIL JUNIOR, C. Comparação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do *Eucalyptus urograndis*: Corpos de prova isentos de defeitos x peças estruturais. **Pesquisa Científica e Inovação Tecnológica nas Engenharias**, p. 133-144, 2019.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; ALVES, R. C. Influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de eucalipto. **Construindo**, v. 5, n. 1, p. 96-103, 2012.

NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de adesão de juntas coladas de diferentes espécies comerciais de madeira. **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 593-601, 2013.

OLIVEIRA, R. G. E.; GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. A. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; CHAVES, I. L. S.; BRITO, A. S. Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* Glulam. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 22, p. 495-504, 2020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000408>

OLIVEIRA, G. G.; PEREIRA, M. S.; ATAÍDE, C. H. Investigation of charcoal and activated charcoal for microwave absorbers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 2022. <https://doi.org/10.1002/cjce.24373>

PAULI, B. A.; AZAMBUJA, M.; OLIVEIRA NETO, L. Madeira lamelada colada: Potencial em edificação, da graduação à industrialização. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 9, n. 24, 2021. <https://doi.org/10.17271/2317860492420212940>

PEIXOTO, L. S.; SORIANO, J.; PELLIS, B. P. Tensões de flexão em vigas de madeira lamelada colada armada avaliadas por modelagem computacional. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 4, 2019, Montevideu, **Anais** [...]. Montevideu: Universidad de la República, 2019. p. 1-10. Disponível em: http://clem2019.uy/admin/files/clem2019/upload/files/F2-4619970-CLEM_2019_Resumo_Completo.pdf. Acesso em: 03 maio. 2020.

PEREIRA, M. C.M.; CALIL JUNIOR, C. Strength and stiffness of cross laminated timber (CLT) panels produced with *Pinus* and *Eucalyptus*: experimental and analytical comparisons. **Matéria**, v. 24, n. 4, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0844>

PERTUZZATTI, A.; CONTE, B.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Influência da umidade na resistência da madeira de eucalipto a impactos. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-6, 2017.

PETRAUSKI, S. M. F. C.; SILVA, J. C.; PETRAUSKI, A.; DELLA LUCIA, R. M. Analysis of eucalyptus glued-laminated timber porticos structural performance. **Revista Árvore**, v. 40, n. 5, p.931-939, 2016.

PINTO JUNIOR, J. E.; SILVEIRA, R. A. A introdução do eucalipto no Brasil pela Embrapa: bases institucionais e sua estruturação para a pesquisa com eucaliptos e corímbias. **Embrapa Florestas**, 2021.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: M. Dekker, 1994. 289p.

PIZZOL, V. D.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. Caracterização elástica de compensados de madeira utilizados e reutilizados em fôrmas através de excitação por impulso. **Revista Matéria**, Suplemento, v. 22, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0264>

PURBA, C. Y. C.; POT, G.; COLLET, R.; CHAPLAIN, M.; COUREAU, J. Assessment of bonding durability of CLT and glulam made from oak and mixed poplar-oak according to bonding pressure and glue type. **Construction and Building Materials**, v. 335, p. 127345, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127345>

RAMFUL, R. Evaluation of the mechanical properties of bambusa bamboo laminates through destructive testing. **Journal of Green Building**, v. 13, n. 4, p. 1-18, 2018. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.13.4.1>

RAO, S. S. **The finite element method in engineering**. Elsevier, 6 ed, 2018. 759 p.

RECALDE, B. R. B. GASTAL, F. P. S. L.; BESSA, V. R. D'A; SCHEWITZ, P. F. Análise numérica de flexão em lajes nervuradas com a consideração dos efeitos de fissuração no concreto. **IBRACON Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 2, p. 225-247, 2015.

RHUDE, A. J. Structural glued laminated timber: History of its origins and early development. **Forest Products Journal**, v. 46, n. 1, p. 15-22, 1996.

SANTIAGO, S. B.; GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; SEGUNDINHO, P. G. D. A.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C. Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. **Matéria**, v. 23, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0485>

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira lamelada colada (MLC). **Matéria**, v. 22, n. 2, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0140>

SEGUNDINHO, P. G. A.; CALIL NETO, C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J.; CALIL JUNIOR, C. Resistência de linhas de cola para madeiras de reflorestamento. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 36, n. 1, p. 107-116, 2015.

SEGUNDINHO, P. G. A.; REGAZZI, A. J.; POLETTI, F. S.; DE PAULA, M. O.; MENDONÇA, A. R.; GONÇALVES, F. G. Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de cedro-australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1163-1178, 2018a.

SEGUNDINHO, P. G. A.; SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira lamelada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Ciência da Madeira**, v. 9, n. 2, p. 123-133, 2018b.

SENA-CRUZ, J.; JORGE, M.; BRANCO, J. M.; CUNHA, V. M. C. F. Bond between glulam and NSM CRFP laminates. **Construction of Building Materials**, v. 40, p. 260-269, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.089>

SERENINE JUNIOR, L. MELO, R. R.; CASTRO, V. G.; SOUZA, M. J. C.; BATISTA, F. G. Qualidade da madeira juvenil de um híbrido clonal (*Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* – H13). **Advances in Forestry Science**, v.6, n.1, p.523-527, 2019. <https://doi.org/10.34062/afs.v6i1.6488>

SERVIÇO NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS - SNIF. **Boletim SNIF 2021**. 2021. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim_SNIF_2021_vfinal.pdf. Acesso em: 26 abr 2022.

SHAKIMON, M. N.; MALEK, N. J. A.; HASSAN, R.; AHMAD, Z. The finite element modelling of glulam tropical timber beam in bending. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, v. 78, n.5, p. 75–78, 2016.

SILVA, T. D. Aplicação do método dos elementos finitos na análise de flambagem de pórticos planos. In: SIMPÓSIO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA, 2, 2017, Curitiba, **Anais** [...]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. p. 1-4. Disponível em: <https://eventos.ufpr.br/smne/SMNE2017>. Acesso em: 03 maio. 2020.

SILVA, P. H. M.; LEE, D. J.; MIRANDA, A. C.; MARINO, C. Sobrevivência e crescimento inicial de espécies de eucalipto em diferentes condições climáticas. **Scientia Florestalis**, v. 45, n. 115, p. 563-571, 2017.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509-516, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>

TRAN, T. T.; THI, V. D.; KHELIFA, M; Oudjene, M; Rogaume, Y. A constitutive numerical modelling of hybrid-based timber beams with partial composite action. **Construction and Building Materials**, v. 178, p 462–472, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.080>

TEREZO, R. F.; ROSA, T. O.; FURTADO, F. R. C.; AMPESSAN, C. G. M.; CUNHA, A. B.; DO VALLE, A. Scarf joints in glued laminated timber of Paricá. **Floresta**, v. 51, n. 3, p. 713-720, 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v51i3.72445>

TRENTO, G. S.; SOMMERFELD, R.; ONUKI, L. T.; STRINGHINI, D. J.; REBELLATO, N. L. B.; COSTA, D. J.; Análise por elementos finitos das forças mastigatórias em uma placa de reconstrução mandibular. **Revista Cirurgia Traumatologia Buco-maxilo-facial**, v. 16, p. 13-17, 2016.

VÉRAS, L. C. L. **Modelos de elementos finitos e técnica de homogeneização aplicados à análise confiabilística de domínios bidimensionais reforçados**. 2018. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

VILELA, R.; MASCIA, N. T.; DONADON, B. F. Avaliação numérica e experimental de vigas de madeira lamelada colada reforçada com fibras vectran. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERAS, 4, 2019, Montevideu, **Anais** [...]. Montevideu: Universidad de la República, 2019. p. 1-13. Disponível em: http://www.clem2019.uy/admin/files/clem2019/upload/files/F2-4601313-CLEM_2019.pdf. Acesso em: 28 abr. 2020.

ZANGIÁCOMO, A. L.; BALANCO, G. G.; CRHISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Glued laminated timber produced with tropical brazilian wood species. **Journal of Applied Science and Technology**, v. 23, p. 1-12, 2017. <http://dx.doi.org/10.9734/CJAST/2017/34690>

CAPÍTULO I - CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DO CLONE DE EUCALIPTO PARA APLICAÇÃO EM ELEMENTOS COLADOS

Resumo: O conhecimento sobre as propriedades tecnológicas da madeira permite o melhor aproveitamento do material. Portanto, o objetivo desse estudo foi realizar a caracterização física, química e mecânica da madeira de eucalipto do clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para a aplicação em elementos colados. Para isso, utilizaram-se peças serradas que, inicialmente, foram classificadas visualmente. A caracterização física da madeira foi realizada com a retirada de corpos de prova de 72 tábuas de dimensões médias de 2,9 × 9,3 × 310,7 cm³ (espessura × largura × comprimento), de forma a determinar o teor de umidade, a densidade básica, a densidade aparente e a estabilidade dimensional. Os teores de extrativos e de cinzas foram obtidos a partir da serragem do material. A caracterização mecânica foi feita por meio de técnicas não destrutivas, com os ensaios de flexão estática, *stress wave*, vibração transversal e vibração longitudinal. O valor médio para densidade básica foi de 0,510 g cm⁻³ e para densidade aparente igual a 0,630 g cm⁻³. O teor de extrativos obtido foi de 6,06% e o teor de cinzas igual a 0,44%, composição química considerada favorável para a colagem. De acordo com os valores médios para retração volumétrica (17,50%) e fator de anisotropia (1,55), a madeira pode ser aplicada para elementos colados. Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos indicam que a madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* apresenta módulo de elasticidade estático igual a 16,45 GPa. Conclui-se que a aplicação dessa espécie para elementos colados é indicada e que os ensaios não destrutivos são eficazes para caracterização da madeira.

Palavras-chave: *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, propriedades físicas, propriedades químicas, módulo de elasticidade, madeira lamelada colada.

CHAPTER I - CHARACTERIZATION OF CLONAL EUCALYPTUS WOOD FOR APPLICATION IN GLUED ELEMENTS

Abstract: Knowledge about the technological properties of wood allows the best use of the material. Therefore, the objective of this study was to perform the physical, chemical and mechanical characterization of eucalyptus wood from the clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* for application in bonded elements. For this, sawn pieces were used, which were initially classified visually. The physical characterization of the wood was carried out with the removal of specimens from 72 boards with average dimensions of $2.9 \times 9.3 \times 310.7 \text{ cm}^3$ (thickness \times width \times length), in order to determine the moisture content, basic density, apparent density and dimensional stability. The extractives and ash contents were obtained from the sawdust of the material. The mechanical characterization was carried out through non-destructive tests, using static bending, stress wave, transverse and longitudinal vibration tests. The average value for basic density was 0.510 g cm^{-3} and for apparent density equal to 0.630 g cm^{-3} . The extractive content obtained was 6.06% and the ash content equal to 0.44%, a chemical composition considered favorable for bonding. According to the average values for volumetric shrinkage (17.50%) and anisotropy factor (1.55), wood can be applied to glued elements. The results obtained in the mechanical tests indicate that the wood of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* has an static modulus of elasticity equal to 16.45 GPa. It is concluded that the application of this species for glued elements is indicated and that non-destructive tests are effective for the characterization of the wood.

Keywords: *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, physical properties, chemical properties, modulus of elasticity, glulam.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um recurso natural renovável com propriedades que possibilitam seu uso na construção civil. Considerando a crescente preocupação com medidas construtivas sustentáveis, que permitam a redução na geração de resíduos e o uso de materiais renováveis, a madeira é uma excelente opção (DZIURKA et al., 2022). A possibilidade de emprego de florestas plantadas, o baixo consumo energético, além de baixa taxa de poluição no processo extrativo, quando comparado à fabricação de produtos convencionais, como concreto e aço, demonstram sua valorização, mediante o uso de medidas ambientalmente corretas (AUGEARD; MICHEL; FERRIER, 2018).

A madeira apresenta também eficiência em relação à diminuição de gases responsáveis pelo efeito estufa em comparação com outros materiais construtivos usuais. Estudos apontam que a produção de concreto representa cerca de 8% das emissões de CO₂ a nível mundial (MILLER; HORVATH; MONTEIRO, 2016). Quando se trata da madeira, cada metro cúbico pode armazenar cerca de 0,8 toneladas de carbono (FAN et al., 2020).

Apesar dos benefícios apresentados, o uso da madeira como material de construção apresenta algumas limitações. Deve-se observar que as propriedades da madeira não são homogêneas, e variam de acordo com a espécie, estrutura anatômica, teor de umidade, mesmo dentro da mesma árvore (PERRIN; YAHYAOU; GONG, 2019). A combinação de condições genéticas e ambientais são os principais fatores que influenciam as mudanças nas características da madeira (ROCHA et al., 2020). Portanto, a aplicação da madeira está condicionada ao conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas de forma a garantir seu bom desempenho (MIRSKI et al., 2021).

Uma alternativa às características limitantes da madeira é o desenvolvimento de produtos processados mecanicamente, que permitam maior controle do processo de fabricação e o emprego de madeira de menor valor agregado. Os produtos resultantes do desenvolvimento tecnológico da madeira incorporam cada vez mais controle e precisão nos métodos construtivos. Dentre estes, destacam-se painéis *Oriented Strand board* – OSB (ZHUANG; CLOUTIER; KOUBAA, 2022), elementos em madeira lamelada colada – MLC (ZANGIACOMO et al., 2017b) e painéis de madeira lamelada colada cruzada, em inglês *Cross Laminated Timber* – CLT (BRANDNER et al., 2016).

Muitos estudos determinando a possibilidade de utilização de várias espécies de madeiras em elementos colados têm sido realizados (DAULETBEK et al., 2021; RESCALVO et al., 2020; LARA-BOCANEGRA et al., 2020; BOURSCHEID et al., 2017). No Brasil, a maioria dos elementos estruturais colados é produzida com madeira de pinus. Entretanto, o uso da madeira de eucalipto é crescente e se apresenta como uma alternativa à fabricação de elementos do tipo madeira lamelada colada - MLC (PEREIRA; CALIL JUNIOR, 2019; SEGUNDINHO et al., 2018).

O objetivo deste estudo foi caracterizar as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira de eucalipto do híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* para aplicação em elementos colados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A madeira de eucalipto do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* foi obtida de serraria do Município de Nova Viçosa, extremo Sul da Bahia. O material é proveniente da extração de florestas adultas de árvores plantadas na região sudeste do Brasil. As tábuas foram retiradas do cerne. As peças serradas foram secas em estufa e não possuem nenhum tipo de tratamento preservativo e apresentam dimensões médias de 2,9 × 9,3 × 310,7 cm³ (espessura × largura × comprimento).

2.1 Classificação visual e caracterização física

A classificação foi a partir de uma inspeção visual das duas faces e das duas bordas de cada peça com relação à existência de defeitos, ao desconsiderar aqueles com ocorrência exclusiva nos topos (ABNT, 2022a). Os seguintes defeitos são considerados; presença de medula, nós, inclinação excessiva das fibras, fissuras passantes e não passantes, distorções dimensionais (encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento, esmoado), ataques biológicos, danos mecânicos.

Para o estudo da caracterização física, foram obtidos corpos de prova aleatórios nas dimensões 2 × 2 × 5 cm de 72 tábuas, sendo a maior medida na direção das fibras. Os corpos de prova foram utilizados para determinação de umidade, densidade básica, densidade aparente e estabilidade dimensional (ABNT, 2022).

2.2 Caracterização química

Para caracterização química, amostras da madeira foram transformadas em elementos menores, do tamanho de palito. Posteriormente, os palitos foram triturados em moinho de facas tipo Willey e transformados em serragem. A serragem foi peneirada em peneiras sobrepostas de 40 e 60 *mesh*. A fração retida na peneira de 60 *mesh* foi mantida em sala climatizada (20°C e 65% de umidade), por 7 dias. O material foi utilizado para a obtenção do teor de extrativos (Figura 1) e teor de cinzas.

A determinação do teor de extrativos totais (TAPPI, 1996) foi realizada pela utilização de 2,0 g de madeira (em base seca) na forma de serragem que foi depositada no aparelho de extração *Soxhlet* com uma solução de álcool tolueno, durante 5 horas. Em seguida, as mesmas amostras foram submetidas à extração em álcool por um período de 4 horas. Por fim, a extração em água quente feita por 1 hora. Os resíduos da evaporação do solvente foram colocados em estufa à temperatura de 60 °C e, posteriormente, foram pesados. O teor de extrativos totais foi obtido pela diferença em relação à massa inicial da amostra.

Figura 1 – Ensaio de teor de extrativos totais para madeira de eucalipto do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*.



Fonte: o autor.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com o método M 11/77 (Associação Brasileira de Técnica de Celulose e Papel - ABTCP, 1977). A amostra de serragem foi preparada com 2,0 g de madeira (em base seca). O material foi depositado em

cadinhos de porcelana com tampa, os quais foram levados à mufla a 575°C, por cerca de 6 horas. Após a carbonização das amostras, as tampas foram retiradas e os cadinhos permaneceram na mufla até a queima total das amostras. Por fim, sobraram somente cinzas no cadinho. As amostras foram retiradas da mufla e dispostas em um dessecador para o resfriamento. Após a pesagem, o teor de cinzas foi calculado.

2.3 Caracterização mecânica por meio de ensaios não destrutivos

As propriedades mecânicas das peças serradas foram obtidas por meio de ensaios não destrutivos. Os métodos empregados foram; flexão estática, vibração transversal, vibração longitudinal e *stress wave*.

O ensaio de flexão estática é um método não destrutivo desde que o carregamento aplicado ao corpo de prova provoque um deslocamento da peça, em que esta retorne ao estado original após a retirada da carga e não atinja a ruptura, ou seja, o módulo de elasticidade é obtido em região elástica e linear (ROSA et al., 2020; SENA et al., 2019; BOURSCHEID et al., 2017).

Neste estudo, os procedimentos da ASTM D 198 (2022) foram utilizados para a realização do ensaio não destrutivo de resistência à flexão a três pontos para a obtenção do módulo de elasticidade. Para o ensaio, as peças foram posicionadas no sentido de menor inércia e estavam bi apoiadas. As peças empregadas apresentaram dimensões estruturais, respeitando a relação $L \leq 21h$, em que L é o comprimento do vão e h a altura da peça. Essa relação permite desprezar os efeitos do cisalhamento no cálculo das deflexões das peças (CHRISTOFORO et al., 2013).

O carregamento foi aplicado em dois pontos equidistantes dos apoios. Os pontos de carga foram instalados a uma distância de sua reação igual a um terço do vão ($l / 3$) (carregamento do terceiro ponto). Para a definição do carregamento, o limite adotado foi a flecha máxima igual a $L/200$, em que L é o comprimento entre apoios. Essa relação garante a linearidade física e geométrica para vigas de madeira (SEGUNDINHO et al., 2012). A leitura do deslocamento foi com o uso de um relógio comparador (Figura 2). O módulo de elasticidade das peças foi obtido por meio da equação para carga concentrada.

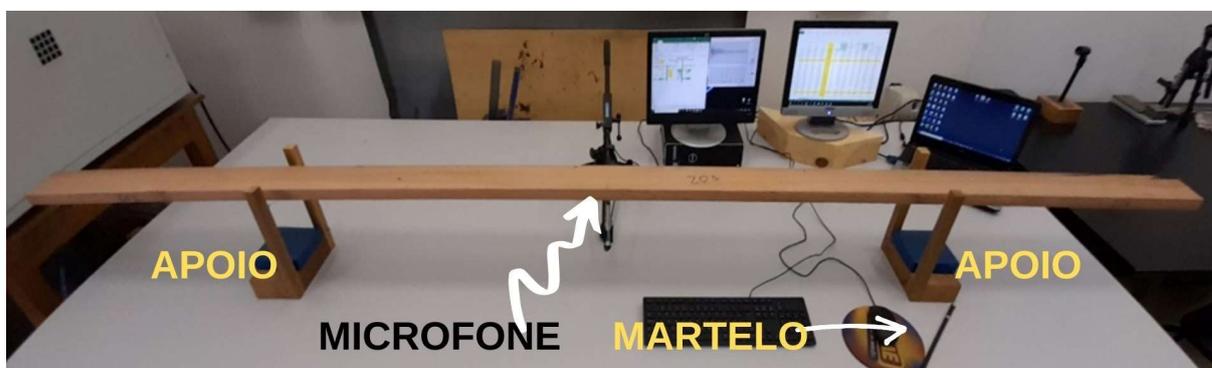
Figura 2 – Ensaio de resistência à flexão estática em 3 pontos.



Fonte: o autor.

O ensaio de vibração transversal foi realizado conforme a ASTM E1876 (2022) (Figura 3). O aparelho *Sonelastic® Stand Alone* foi empregado na execução do procedimento. O sistema possui um martelo utilizado para excitar o corpo de prova e um microfone direcional com pedestal para a captura de frequências de até 20 kHz.

Figura 3 – Ensaio de vibração transversal



Fonte: o autor.

O ensaio de vibração longitudinal foi realizado de acordo com a ASTM E1876 (2022). O procedimento para execução do ensaio de vibração longitudinal é semelhante ao de vibração transversal livre, mas com sentido do impacto e captação do som na direção longitudinal.

As medições realizadas pelo método *Stress wave* são embasadas no conceito de que a propagação da onda de tensão é sensível à presença de deterioração de membros de madeira (ROSS, 2015). As ondas de tensão atravessam mais rápido a

madeira sólida que a madeira com algum defeito ou mesmo danificada por agentes deterioradores. O equipamento de aquisição utilizado para execução do método foi o *Fakopp* (Figura 4) e seguiu a metodologia de Görgün e Dündar (2018).

Figura 4 – Método *stress wave* utilizando o equipamento *Fakopp*



Fonte: o autor.

2.4 Análise estatística

As propriedades da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* foram avaliadas com estatística descritiva. As análises estatísticas para estimativa do módulo de elasticidade (MOE) foram consideradas em delineamento inteiramente casualizado (DIC). O teste de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para verificar a normalidade dos dados. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, F; $p < 0,05$) com aplicação de teste de médias (Tukey, $p < 0,05$). A anova de uma via com medidas repetidas foi empregada para verificar o efeito dos ensaios não destrutivos sobre o resultado dos módulos de elasticidade. A comparação entre pares foi com a correção de Bonferroni.

O grau de correlação entre os ensaios não destrutivos de propriedade mecânica foi obtido pelo coeficiente de Pearson. Modelos de regressão linear foram gerados a partir das correlações significativas e analisados pela análise de variância (F; $p < 0,05$). Neste caso, a qualidade dos ajustes foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2). Os dados foram processados e analisados no *software* R (R Core Team, 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Classificação visual

Das 79 peças analisadas, sete foram descartadas por apresentarem defeitos superiores aos estipulados pela NBR 7190-2:2022 (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação visual das lamelas de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, conforme NBR 7190-2:2022.

| CLASSES | | | Descarte | Total de tábuas |
|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | | |
| 44 | 17 | 11 | 7 | 79 |

*Classes definidas conforme Apêndice 2 da NBR 7190-2:2022 para híbrido interespecífico de *E. urophylla* e *E. grandis* (*urograndis*).

Fonte: o autor.

A classificação visual é um método de baixo custo que permite a verificação de peças com defeitos visíveis a olho nu. O método é considerado eficaz quando aplicado em grande volume de madeira para a produção de elementos colados estruturais em grande escala (GLAVINIC et al., 2020). Entretanto, a inspeção visual possui suas limitações e não deve ser usada isoladamente (MIRSKI et al., 2021), já que não possibilita uma avaliação numérica da resistência da peça. Sendo assim, a classificação visual teve como objetivo o descarte de peças com defeitos. A caracterização física e mecânica foi realizada nas demais peças.

3.2 Caracterização física

Os valores médios das propriedades físicas, densidade aparente, umidade e estabilidade dimensional da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios das propriedades físicas da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*.

| ρ_{bas}^* (g.cm ⁻³) | ρ_{ap}^* (g.cm ⁻³) | U (%) | Estabilidade dimensional | | | |
|---|--|-------|--------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|
| | | | Retração tangencial (%) | Retração radial (%) | Varição volumétrica (%) | Fator anisotrópico |
| 0,51 | 0,63 | 10,68 | 8,94 | 6,12 | 17,50 | 1,55 |

* ρ_{bas} : densidade básica; ρ_{ap} : densidade aparente.

As propriedades físicas são parâmetros importantes para a avaliação da qualidade da madeira e sua consequente aplicação. A densidade e a umidade influenciam o processo de produção dos elementos colados. Madeiras muito densas possibilitam mudanças bruscas de umidade, o que aumenta a tensão na linha de cola (FARIA; MENDES; JÚNIOR, 2020). Além disso, madeiras com densidades altas tendem a ter maior dificuldade de colagem, uma vez que a densidade interfere na pressão e tempo de prensagem dos elementos estruturais (SEGUNDINHO et al., 2018).

Os valores médios obtidos para densidade básica ($0,51 \text{ g.cm}^{-3}$), densidade aparente ($0,63 \text{ g.cm}^{-3}$) e umidade (10,68%) mostram que a madeira estudada apresenta propriedades físicas favoráveis para a execução de elementos colados de MLC.

Dois lotes de madeira de *Eucalyptus* sp. foram avaliados por Segundinho et al. (2018) para a produção de MLC. Os valores médios de densidade básica obtidos foram $0,51$ e $0,54 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente. Oliveira et al. (2020) obtiveram densidade aparente média de $0,590 \text{ g.cm}^{-3}$ para madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*.

Os valores médios obtidos para retração radial, retração tangencial e variação volumétrica foram condizentes aos encontrados por outros pesquisadores, que utilizam a mesma espécie de madeira (TALGATTI et al., 2018; ELEOTÉRIO et al., 2015; DELUCIS et al., 2014).

O fator anisotrópico pode ser considerado o parâmetro mais eficiente para avaliar a estabilidade dimensional da madeira. Conforme Oliveira et al. (2010), para espécies consideradas muito estáveis, o fator anisotrópico pode variar de 1,3 a 1,4 e, para madeiras extremamente instáveis dimensionalmente, o fator é superior a 3, o que classifica a madeira deste estudo como estável. Nesse sentido, os resultados obtidos para retração volumétrica e fator de anisotropia permitem afirmar que a madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* pode ser aplicada para elementos colados, desde que serrada e seca de forma correta (SERENINI et al., 2020). O processo de secagem das tábuas deve garantir a homogeneização do teor de umidade, evitando a ocorrência de defeitos que possam reduzir a qualidade da

colagem. Para a correta adesão, as tábuas adjacentes não devem apresentar variação excessiva de umidade (PRÖLLER et al., 2018).

3.3 Caracterização química

Os teores de extrativos totais e de cinzas da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* encontrados neste estudo foram, respectivamente, 6,06% e 0,44%. A caracterização química de *Eucalyptus benthamii* feita por Carrillo et al. (2018) resultou em valor semelhante para o teor de extrativos (6,70%). Na análise de Silva e Ataíde (2019), o teor de cinzas obtido para o mesmo clone analisado nesta pesquisa foi de 0,46%. As características químicas da madeira de cinco clones de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*, com 27 meses de idade apresentaram resultados condizentes a este estudo para teor de extrativos (6,45%) e teor de cinzas (0,68%) (HSING; PAULA; PAULA, 2016).

Deve-se observar que a constituição química da madeira pode interferir no processo de colagem e está associada principalmente ao teor de extrativos presentes na superfície a ser colada e ao teor de cinzas (FARIA; MENDES; JÚNIOR, 2020; SANTIAGO et al., 2018).

Embora essas propriedades possam garantir maior durabilidade natural da madeira, elas podem influenciar desde o tempo de cura do adesivo e até na resistência da junta colada (WIDYORINI et al., 2020; FONTE et al., 2017). De acordo com (Izdinsky et al., 2021), a molhabilidade da madeira, a estabilidade dos sistemas adesivos e a qualidade da adesão final podem ser influenciadas negativamente ou positivamente pelo teor extrativos da madeira e por produtos químicos ou outros excipientes adicionados ao material.

Os extrativos desempenham um papel importante nos processos de colagem, pois podem contribuir ou determinar as propriedades de colagem relevantes da madeira, como acidez (valor de pH), molhabilidade (ângulo de contato, energia livre de superfície, tensão superficial) ou mesmo permeabilidade (entupimento de lúmens por cristais e tiloses) (IŽDINSKÝ et al., 2021; JANKOWSKA et al., 2018; ROFFAEL, 2016). Extrativos com alta acidez aceleram a cura de adesivos como melamina-uréia-formaldeído (MUF), desaceleram a ligação com adesivos como o fenol-formaldeído (PF) (BOCKEL et al., 2019) e podem causar a degradação de adesivos à base de poliuretano (BOCKEL et al., 2018).

3.4 Caracterização mecânica por meio de ensaios não destrutivos

A estatística descritiva (média, desvio padrão e coeficiente de variação) dos módulos de elasticidade obtidos pelos ensaios não destrutivos (flexão estática, vibração longitudinal, vibração transversal e *stress wave*) consta na Tabela 3. Observa-se que os dados apresentaram variabilidade aceitável, entre 10% e 12% (MVOLO; STEWART; KOUBAA, 2021; STANGERLIN et al., 2010).

Tabela 3 – Estatística descritiva dos módulos de elasticidade obtidos pelos ensaios não destrutivos.

| Parâmetros estatísticos | E_{FE} (GPa) | E_{VL} (GPa) | E_{VT} (GPa) | E_{SW} (GPa) |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Média | 16,45 a | 17,22 b | 16,47 a | 16,69 a |
| Desvio padrão | 3,45 | 3,46 | 3,31 | 3,21 |
| Mediana | 15,68 | 16,64 | 15,20 | 15,85 |
| Coeficiente de variação (%) | 11,93 | 11,99 | 10,95 | 10,32 |

Obs: E_{FE} = módulo de elasticidade obtido por flexão estática, E_{VL} = módulo de elasticidade obtido por vibração longitudinal, E_{VT} = módulo de elasticidade obtido por vibração transversal, E_{SW} = módulo de elasticidade obtido por *stress wave*. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente (Tukey, $p > 0,05$).

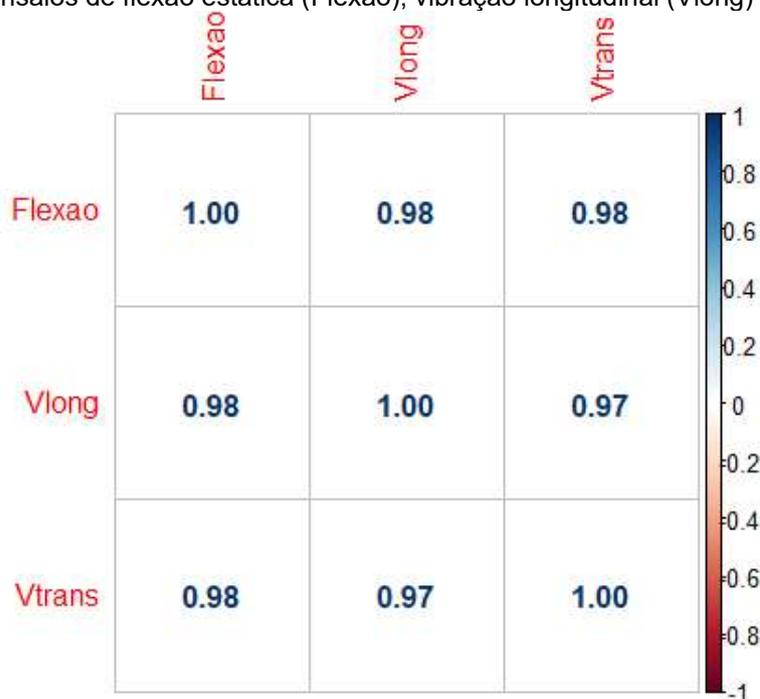
Os resultados obtidos apresentaram distribuição normal de acordo com o teste Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,05$). Após o atendimento dos pressupostos (normalidade, homoscedasticidade, independência e esfericidade), a análise de variância foi aplicada por meio da Anova de uma via com medidas repetidas. A Anova mostrou que há um efeito dos ensaios utilizados sobre o resultado dos módulos de elasticidade obtidos [$F(3, 240) = 36,9$; $p < 0,001$].

Pela comparação entre pares, observou-se que o ensaio de vibração longitudinal apresentou módulo de elasticidade médio superior e estatisticamente diferente dos módulos médios obtidos nos demais ensaios (Tabela 3). Tal fato pode ter ocorrido pela velocidade no sentido longitudinal apresentar sensibilidade às diferenças anatômicas, a qual está diretamente relacionada à continuidade dos elementos estruturais, com reflexos na amplitude encontrada entre os valores máximos e mínimos de velocidade (HODOUŠEK et al., 2017; GONÇALVES; BARTHOLOMEU, 2000).

De acordo com os resultados obtidos, os módulos de elasticidade obtidos pelo ensaio de flexão estática e os módulos dinâmicos apresentam correlação positiva e

próximas a 1, o que indica que as variáveis estão diretamente correlacionadas (Figura 5).

Figura 5 – Matriz gráfica de correlação de Pearson para os módulos de elasticidade obtidos pelos ensaios de flexão estática (Flexão), vibração longitudinal (Vlong) e vibração transversal (Vtrans).

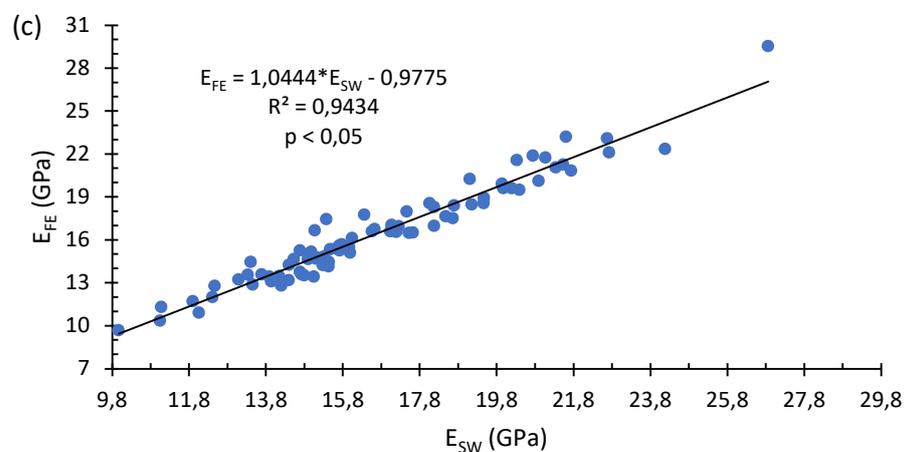
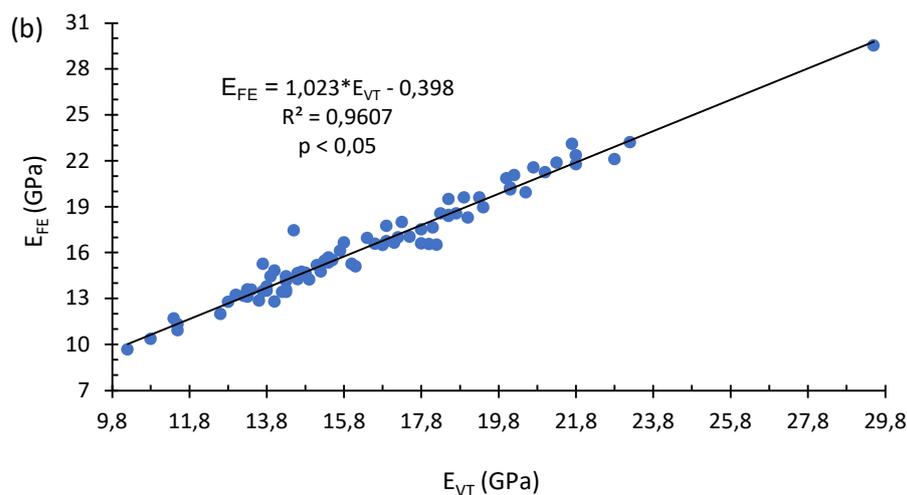
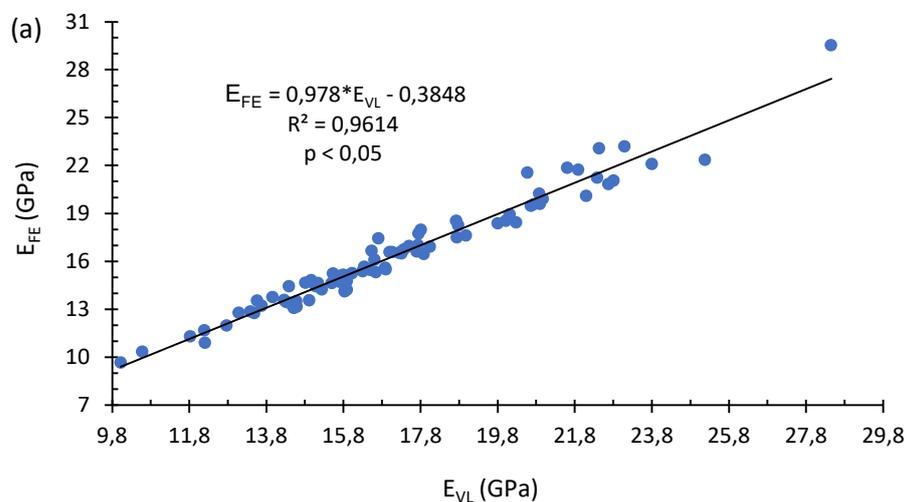


Fonte: o autor.

Segundo Chauhan e Sethy (2016), o módulo dinâmico está correlacionado com o ângulo microfibrilar na madeira. As folhosas são geralmente conhecidas por terem uma variação relativamente pequena do ângulo microfibrilar quando comparadas às coníferas (DONALDSON, 2008), o que permite que essas apresentem melhor correlação entre módulos dinâmicos e estáticos.

Tendo em vista que os dados analisados atenderam aos pressupostos de linearidade, foram implementados modelos de regressão linear para verificar a correlação entre o módulo de elasticidade estático e os módulos de elasticidade dinâmicos obtidos pelos ensaios de vibração longitudinal, vibração transversal e *stress wave* (Figura 6).

Figura 6 – Modelos de regressão linear: (a) Módulo de elasticidade pelo ensaio de vibração longitudinal (E_{VL}) x Módulo de elasticidade pelo ensaio de flexão estática (E_{FE}); (b) Módulo de elasticidade pelo ensaio de vibração transversal (E_{VT}) x Módulo de elasticidade pelo ensaio de flexão estática (E_{FE}); (c) Módulo de elasticidade pelo ensaio de *stress wave* (E_{SW}) x Módulo de elasticidade pelo ensaio de flexão estática (E_{FE}).



Fonte: o autor.

Os modelos estatísticos desenvolvidos apresentam correlações significativas, com coeficientes de determinação (R^2) próximos de 1. A análise de resíduos das regressões foi verificada e constatou-se que estes se encontram uniformemente distribuídos em torno do zero, indicando a boa adequação dos modelos desenvolvidos. Portanto, pode-se concluir que há evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pelas equações de regressão linear (Figura 6) é significativa em todos os casos estudados ($p < 0,05$). Sendo assim, os modelos de regressão linear apresentados são adequados para representar a relação entre flexão estática e os ensaios dinâmicos para a amostra pesquisada.

Do ponto de vista da análise dinâmica, outros autores obtiveram correlações fortes entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico de elementos de madeira (SOUZA et al, 2022; NARVÁEZ-MUÑOZ et al., 2021; OLAOYE; OKON-AKAN, 2020; FATHI; NASIR; KAZEMIRAD, 2020). No estudo, com diferentes espécies tropicais, a análise de correlação comprovou a adequação dos métodos dinâmicos para predições do módulo de elasticidade com maior grau de precisão para métodos de ressonância (BAAR; TIPPNER; RADEMACHER, 2015). Foi observada uma relação muito próxima entre os dois métodos de ressonância que se embasam em um modo diferente de vibração e sua frequência fundamental, com o coeficiente de correlação igual a 0,99.

O ensaio de vibração transversal foi aplicado para averiguar o módulo de elasticidade de flexão em toras de *Corymbia citriodora*. As amostras foram testadas pelo método dinâmico posteriormente, e pelo método de flexão estática. Uma forte correlação ($R^2 = 0,92$) foi encontrada entre o módulo de elasticidade de flexão estático e dinâmico (CARREIRA; DIAS; SEGUNDINHO, 2017).

A técnica de excitação por impulso aplicada no *Sonelastic* foi empregada para predição do módulo de elasticidade da madeira de *Eucalyptus grandis* (LIMA JUNIOR et al., 2018). Os resultados encontrados foram comparados aos módulos estáticos. O coeficiente de determinação obtido por meio da análise de regressão linear entre as variáveis foi $R^2=0,85$.

Os resultados apresentados neste estudo permitem afirmar que técnicas não destrutivas são capazes de prever o módulo estático da madeira de forma eficiente e rápida. A caracterização mecânica das peças garante a utilização racional da madeira, pois permite o balanceamento, ou seja, a disposição das lamelas de maior resistência

nas zonas de maiores solicitações e as lamelas de qualidade inferior nas zonas menos solicitadas (MASCIA et al., 2018).

4 CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados, pode-se concluir que a madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* pode ser empregada na fabricação de elementos de MLC. A madeira apresenta densidade média, o que é favorável no processo de colagem. A retração volumétrica e o fator anisotrópico encontrados permitem afirmar que a madeira é considerada moderadamente estável dimensionalmente.

Da caracterização química da madeira foram obtidos o teor de extrativos e de cinzas susceptíveis à aplicação de adesivo, as quais podem garantir estabilidade coesiva e uma adesão satisfatória.

Os resultados obtidos por meio dos ensaios mecânicos não destrutivos indicam a possibilidade de utilização na fabricação de elementos estruturais de MLC. Os métodos dinâmicos podem ser aplicados para verificação do módulo de elasticidade da madeira com boas relações em relação ao ensaio de flexão estática.

5 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198 - 22**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Philadelphia. 2022.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM E1876 – 22**: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Philadelphia. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - **ABTCP - M 11/77**. Normas técnicas. São Paulo: 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7190-2: Parte 02**: Madeiras - Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. ABNT. Rio de Janeiro. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7190-3: Parte 03**: Madeiras - Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. ABNT. Rio de Janeiro. 2022.

AUGEARD, E.; MICHEL, L.; FERRIER, E. Experimental and analytical study of the mechanical behavior of heterogeneous glulam–concrete beams and panels

assembled by a specific treatment of wood. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 812-825, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.038>

BAAR, J.; TIPPNER, J.; RADEMACHER, P. Prediction of mechanical properties-modulus of rupture and modulus of elasticity-of five tropical species by nondestructive methods. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 17, n. 2, p. 239-252, 2015. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>

BOCKEL, S.; MAYER, I.; KONNERTH, J.; HARLING, S.; NIEMZ, P.; SWABODA, C.; PICHELIN, F. The role of wood extractives in structural hardwood bonding and their influence on different adhesive systems. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 91, p. 43-53, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.03.001>

BOCKEL, S.; MAYER, I.; KONNERTH, J.; NIEMZ, P.; SWABODA, C.; BEYER, M.; PICHELIN, F. Influence of wood extractives on two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding. **The Journal of Adhesion**, v. 94, n. 10, p. 829-845, 2018. <https://doi.org/10.1080/00218464.2017.1389279>

BOURSCHEID, C. B.; ROSA, T. O.; STÜPP, A. M.; VIEIRA, H. C.; TEREZO, R. F.; CUNHA, A. B. Influência da classificação visual de defeitos na rigidez de lâminas de *Cryptomeria japônica* e *Cupressus lusitanica* para produção de madeira laminada colada. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 2, 2017, Buenos Aires, **Anales ...** Buenos Aires: Universidad Nacional Noroeste, 2017. p. 1-7.

BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G.; THIEL, A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 331-351, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

CALIL NETO, C.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; LAHAR, F. A. R. Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em X em corpos de prova de MLC com madeiras do tipo *Eucalypto urograndis*. **Matéria**, v. 22, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0121>

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; SEGUNDINHO, P. G. A. Nondestructive evaluation of *corymbia citriodora* logs by means of the free transverse vibration test. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 36, n. 2, p. 1-7, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0401-0>

CARRILLO, I.; MENDONÇA, R. T.; AGO, M. Comparative study of cellulosic components isolated from different Eucalyptus species. **Cellulose**, v., p. 1011-1029, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1653-2>

CHAUHAN, S.; SETHY, A. Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 18, n. 2, p. 373-382, 2016. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000034>

CHRISTOFORO, A. L.; MOLINA, J. C.; PANZERA, T. H.; ALMEIDA, D. H. D.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; SCALIANTE, R. D. M.; LAHR, F. A. R. Módulo de elasticidade em vigas de madeira de dimensões estruturais pelo método dos mínimos quadrados. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 981-988, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500020>

DAULETBEK, A.; LI, H.; XIONG, Z.; LORENZO, R. A review of mechanical behavior of structural laminated bamboo lumber. **Sustainable Structures**, v. 1, n. 1, p. 4-18, 2021. <http://doi.org/10.54113/j.sust.2021.000004>

DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G. D.; MISSIO, A. L.; SCHNEID, E. Propriedades físicas da madeira termorretificada de quatro folhosas. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 1, p. 99-107, 2014. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2014.008>

DZIURKA, D.; KAWALERCZYK, J.; WALKIEWICZ, J.; DERKOWSKI, A.; MIRSKI, R. The possibility to use pine timber pieces with small size in the production of glulam beams. **Materials**, v. 15, n. 9, p. 3154, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15093154>

DONALDSON, L. Microfibril angle: measurement, variation and relationships—a review. **Iawa Journal**, v. 29, n. 4, p. 345-386, 2008.

ELEOTÉRIO, J. R.; REICHERT, D.; HORNBURG, K. F.; MENEGUELLI, I. Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 329-336, 2014. <http://doi.org/10.5380/rf.v45i2.34699>

FAN, J.; CHEN, L.; ZHANG, D.; NIE, H.; MAO, A.; YANG, L.; YUAN, Y. Study on environment and carbon sequestration effect of wood structure building based on sustainable development. **American Journal of Environmental Science and Engineering**, v. 4, n. 4, p. 65-69, 2020.

FARIA, D. L.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo poliuretano. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, e3231, 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.11>

FATHI, H.; NASIR, V.; KAZEMIRAD, S. Prediction of the mechanical properties of wood using guided wave propagation and machine learning. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120848, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120848>

FONTE, A. P. N.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; ANJOS, R. A. M. Propriedades físicas e químicas da madeira de cerne e alburno de *Cryptomeria japonica*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 3, p. 277-285, 2017. <http://doi.org/10.5965/223811711632017277>

GLAVINIC, I. U.; BOKO, I.; TORIC, N.; VRANKOVIC, J. L. Application of hardwood for glued laminated timber in Europe. **Journal of the Croation Association of Civil Enginners**, v. 72, n. 7, p. 607-616, 2020. <https://doi.org/10.14256/JCE.2741.2019>

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 269-274, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000200023>

GORGUN, H. V.; DUNDAR, T. Strength grading of turkish black pine structural timber by visual evaluation and nondestructive testing. **Maderas. Maderas: Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 1, p. 57-66, 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005001501>

HSING, T. Y.; PAULA, N. F.; PAULA, R. C. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016. <https://doi.org/10.5902/1980509821119>

HODOUSEK, M.; DIAS, A. M. P. G.; MARTINS, C.; MARQUES, A. F. S.; BOHM, M. Comparison of non-destructive methods based on natural frequency for determining the modulus of elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadensis*. **BioResources**, v. 12, n. 1, p. 270-282, 2017.

IZDINSKY, J.; REINPRECHT, L.; SEDLIACIK, J.; KÚDELA, J.; KUEROVÁ, V. Bonding of selected hardwoods with PVAc adhesive. **Applied Sciences**, v. 11, n. 1, p. 67, 2020. <https://doi.org/10.3390/app11010067>

JANKOWSKA, A.; BORUSZEWSKI, P.; DROZDZEK, M.; RĘBKOWSKI, B.; KACZMARCZYK, A.; SKOWROŃSKA, A. The role of extractives and wood anatomy in the wettability and free surface energy of hardwoods. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 3082-3097, 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, 120355, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120355>

LIMA JUNIOR, M. P.; BIAZZON, J. C.; DE ARAUJO, V. A.; MUNIS, R. A.; MARTINS, J. C.; CORTEZ-BARBOSA, J.; MORALES, E. A. M. Mechanical properties evaluation of *Eucalyptus grandis* wood at three different heights by impulse excitation technique (IET). **Bioresources**, v. 13, n. 2, p. 3377-3385, 2018.

MASCIA, N. T.; BERTOLINE, C. A. A.; BASÁGLIA, C. D.; DONADON, B. F. Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by Vectran fibers. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 359-373, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300286>

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Readily implementable techniques can cut annual CO2 emissions from the production of concrete by over 20%. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 7, p. 074029, 2016.

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; CHUDA-KOWALSKA, M.; WIERUSZEWSKI, M.; KAWALERCZYK, J.; TROCINSKI, A. The usefulness of pine timber (*Pinus sylvestris* L.) for the production of structural elements. Part I: Evaluation of the quality of the pine timber in the bending test. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 3957, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13183957>

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; CHUDA-KOWALSKA, M.; WIERUSZEWSKI, M.; KAWALERCZYK, J.; TROCINSKI, A. The usefulness of pine timber (*Pinus sylvestris* L.) for the production of structural elements. Part II: Strength properties of glued laminated timber. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 4029, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13184029>

MVOLO, C. S.; STEWART, J. D.; KOUBAA, A. Comparison between static modulus of elasticity, non-destructive testing moduli of elasticity and stress-wave speed in white spruce and lodgepole pine wood. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1871949>

NARVÁEZ-MUÑOZ, C.; SEGURA, L. J., LÓPEZ LÓPEZ, A., GARCÍA, A., GONZÁLEZ, O. M., HARO, E. E. Estimation of the dynamic elastic properties and energy dissipation capacity of wood from *Ochroma Pyramidale* (Balsa). In: Botto-Tobar, M., Montes León, S., Torres-Carrión, P., Zambrano Vizuite, M., Durakovic, B. (eds) **Applied Technologies**. ICAT 2021. Communications in Computer and Information Science, 1535. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03884-6_11

NASIR, V.; FATHI, H.; KAZEMIRAD, S. Combined machine learning-wave propagation approach for monitoring timber mechanical properties under UV aging. **Structural Health Monitoring**, v. 20, n. 4, p. 2035-2053, 2021. <https://doi.org/10.1177/1475921721995987>

OLAOYE, Kayode; OKON-AKAN, O. A. Estimation of modulus of elasticity of *Boscia angustifolia* wood using longitudinal vibration acoustic method. **International Wood Products Journal**, v. 11, n. 3, p. 122-128, 2020. <https://doi.org/10.1080/20426445.2020.1738118>

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000500018>

OLIVEIRA, R. G. E.; GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G. D. A.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; PAES, J. B.; CHAVES, I. L.; BRITO, A. S. Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* glulam. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 22, n. 4, p. 495-504, 2020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000408>

PEREIRA, M. C. M.; CALIL JUNIOR, C. Strength and stiffness of cross laminated timber (CLT) panels produced with *Pinus* and *Eucalyptus*: experimental and analytical comparisons. **Revista Matéria**, v. 24, n. 4, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0684>

PERRIN, M.; YAHYAOU, I.; GONG, X. Acoustic monitoring of timber structures: Influence of wood species under bending loading. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 125-134, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.175>

PRÖLLER, M.; NOCETTI, M.; BRUNETTI, M.; BARBU, M. C.; BLUMENTRITT, M.; WESSELS, C. B. Influence of processing parameters and wood properties on the edge gluing of green *Eucalyptus grandis* with a one-component PUR adhesive. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, n. 4, p. 1195-1204, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1313-0>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: junho 2022.

RESCALVO, F. J.; TIMBOLMAS, C.; BRAVO, R.; GALLEGU, A. Experimental and numerical analysis of mixed I-214 poplar/*pinus sylvestris* laminated timber subjected to bending loadings. **Materials**, v. 13, n. 14, p. 3134, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13143134>

ROCHA, S. M. G.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, M. N. F.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; FIGURA, M. A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in *eucalyptus* clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, p. 118290, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290>

ROFFAEL, E. Significance of wood extractives for wood bonding. **Applied Microbiology and Biotechnology** v. 100, p. 1589-1596, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7207-8>

ROSA, R. A.; FRANÇA, L. C. A.; SEGUNDINHO, P. G.; LUBE, V. M.; PAES, J. B. Caracterização da madeira de maçaranduba (*Manilkara* sp.) por métodos destrutivos e não destrutivos. **Ciência da Madeira**, v. 5, n. 1, p. 10-12953/2177-6830, 2014.

ROSS, R. J. (Ed.). **Nondestructive evaluation of wood**. Government Printing Office, 2015.

SANTIAGO, S. B.; GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; SEGUNDINHO, P. A. G.; PAES, J. B.; ARANTES, M.D.C. Eucalypts wood glue with natural adhesives. **Matéria**, v. 23, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0485>

SEGUNDINHO, P. G. A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JUNIOR, C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1155-1162, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000600016>

SEGUNDINHO, P. G.; P. G., SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G., REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com

adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Ciência da Madeira**, v. 9, n. 2, p. 123-133, 2018. <http://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p123-133>

SERENINI, L.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; PIMENTA, A. S. Wood quality of six eucalyptus clones planted in northern Mato Grosso State, Brazil. **Wood Research**, v. 65, n. 4, p. 543-554, 2020. <http://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.4.543554>

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509-516, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>

SOUZA, C. G. F.; MASTELA, L. C.; OLIVEIRA, R. F.; BREDÁ, A. M.; TAQUETTI, V. B.; SEGUNDINHO, P. G. A. Avaliação dos módulos de elasticidade por meio de ensaios não destrutivos para madeira laminada colada. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 6, p. 47288-47298, 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n6-298>

STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; MELO, R. R.; CALEGARI, L.; VIVIAN, M. A.; CASTELO, P. A. R.; BELTRAME, R. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, v. 1, n. 2, p. 44-53, 2010.

TALGATTI, M.; SILVEIRA, A. G.; SANTINI, E. J.; GORSKI, L.; BALDIN, T.; VALCORTE, G. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de clones de eucalipto. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n. 4, p. 434-442, 2018.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. **T-204 om-88**: Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1996.

WIDYORINI, R.; SYAMSUDIN, T. S., ALAMSYAH, E. M., PURWASASMITA, B. S. Bonding strength of plywood bonded using phenol formaldehyde mixed with wood bark powder nanofiller. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 17, n. 1, p. 21-33, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13196-019-00250-z>

ZANGIÁCOMO, A. L.; BALANCO, G. G.; CRHISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Glued laminated timber produced with tropical brazilian wood species. **Journal of Applied Science and Technology**, v. 23, p. 1-12, 2017.

ZHUANG, B.; CLOUTIER, A.; KOUBAA, A. Physical and mechanical properties of oriented strand board made from Eastern Canadian softwood species. **Forests**, v. 13, n. 4, p. 523, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13040523>

CAPÍTULO II - COMPORTAMENTO DA ADESÃO A TRÊS ADESIVOS ESTRUTURAIS EM MADEIRA DE EUCALIPTO

Resumo: No presente estudo, avaliou-se o comportamento da adesão da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* com a aplicação de três adesivos estruturais. O estudo foi realizado em 12 vigas de madeira lamelada colada (MLC) produzidas com os adesivos melamina-ureia-formaldeído (MUF), resorcinol-formaldeído (RF) e poliuretano (PUR), sendo quatro vigas por adesivo. A caracterização dos adesivos foi por meio da investigação do pH, viscosidade, densidade e teor de sólidos. A avaliação da interface madeira-adesivo foi conduzida com o estudo da resistência ao cisalhamento, da porcentagem de falha na madeira, delaminação e análise de fotomicrografia. A metodologia de microdensitometria de Raio X foi empregada para análise dos perfis de densidade aparente de corpos de prova nas vigas de MLC. A porcentagem de resistência à perfuração foi verificada com o uso de um resistógrafo. O pH dos adesivos estudados permaneceu dentro da faixa de 6,35 e 9,05. Os resultados mostraram que a MUF apresenta maior viscosidade (1.169 cP). Os resultados obtidos para densidade dos adesivos variaram de 1,29 a 1,67 g.cm⁻³. Verificou-se que não houve diferença estatística nos resultados obtidos para a resistência ao cisalhamento na linha de cola, na condição seca. O adesivo MUF apresentou menor porcentagem de falha na madeira que o PUR e RF. O ensaio de delaminação realizado mostrou que os corpos de prova colados com RF apresentaram os melhores resultados. As fotomicrografias permitiram verificar que houve penetração dos adesivos na estrutura anatômica da madeira. Os perfis de densitometria e resistografia representam satisfatoriamente a configuração utilizada para o balanceamento das vigas de MLC. O adesivo RF apresentou características superiores na colagem, quando se analisa a resistência ao cisalhamento, a falha na madeira e a delaminação.

Palavras-chave: linha de cola, resistência ao cisalhamento, delaminação, fotomicrografias, densitometria.

CHAPTER II - ADHESION BEHAVIOR TO THREE STRUCTURAL ADHESIVES FOR EUCALYPTUS WOOD

Abstract: In the present study, the adhesion behavior of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* clone wood was evaluated with the application of three structural adhesives. For the study, 12 glulam beams were produced with melamine-urea-formaldehyde (MUF), resorcinol-formaldehyde (RF) and polyurethane (PUR) adhesives, four beams per adhesive. The characterization of the adhesives was carried out by investigating of pH, viscosity, density and solids content. The evaluation of the wood-adhesive interface was carried out with the study of shear strength, percentage of wood failure, delamination and photomicrographic analysis. The X-ray microdensitometry methodology was used to analyze the apparent density profiles of specimens in the glulam beams. The percentage of drilling resistance was verified using a resistograph. The pH of the studied adhesives remained within the range of 6.35 and 9.05. The results showed that MUF has a higher viscosity (1169 cP). The results obtained for adhesive density ranged from 1.29 to 1.67 g.cm⁻³. It was verified that there was no statistical difference in the results obtained for the shear strength in the glue line, in the dry condition. The MUF adhesive showed a lower percentage of wood failure than the PUR and RF. The delamination test performed showed that the specimens glued with RF showed the best results. The photomicrographs allowed to verify that there was penetration of the adhesives in the anatomical structure of the wood. The densitometry and resistography profiles satisfactorily represent the configuration used for balancing the glulam beams. The RF adhesive showed superior characteristics in gluing, when analyzing the shear strength, wood failure and delamination.

Keywords: glue line, shear strength, delamination, photomicrographs, densitometry, drilling resistance.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de produtos laminados de engenharia a partir de madeiras de folhosas vêm ganhando destaque no mercado mundial (GLAVINIC et al., 2020; MORIN-BERNARD et al., 2020; ADHIKARI et al., 2020; ESPINOZA; BUEHLMANN, 2018). Dentre estas, o gênero *Eucalyptus* é uma alternativa viável pelas suas características como, alta produtividade e ciclo de crescimento reduzido (BARROS; REZENDE; CAMPOS, 2019). Embora, o eucalipto seja, geralmente, utilizado como matéria-prima para celulose e papel, o interesse em seu emprego no desenvolvimento de produtos para construção civil de maior valor agregado, como a madeira lamelada colada (MLC) vem sendo pesquisado (LARA-BOCANEGRA et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020; SEGUNDINHO et al., 2021, MOYA et al., 2019).

Para melhor compreensão do comportamento dos elementos estruturais em MLC é necessário investigar o processo de colagem, com o desempenho da adesão observado por meio do estudo da linha de cola. A integridade da linha de cola é um fator essencial para garantir a resistência geral do produto (DIESTCH; TANNERT, 2015). As condições físicas e químicas das superfícies durante a adesão são importantes para a obtenção de uma ligação de alto desempenho (BUKHARI et al., 2020).

A análise de uma ligação adesiva deve ser realizada considerando o comportamento do sistema adesivo/aderente. A penetração e distribuição do adesivo são influenciadas pelas características inerentes à anatomia da madeira e se referem às diferenças de dimensões dos elementos, tamanho, disposição e frequência das cavidades celulares (RINDLER; HANSMANN; KONNERTH, 2019; ALBINO; MORI; MENDES, 2010). Neste contexto, a análise da interação do adesivo com a madeira deve compreender o estudo de imagens da linha de cola em escala microscópica de forma a verificar a penetração nos elementos celulares (TOUMPANAKI; SHAH; EICHHORN, 2018).

Somada à definição da espécie empregada na produção de elementos colados, a determinação do adesivo passa por questões sustentáveis e econômicas. O adesivo desempenha um papel fundamental na resistência da peça estrutural, transferindo a tensão de um componente para outro (PARRA-SERRANO et al., 2018). Ao realizar a colagem, pretende-se que a resistência da linha de cola seja superior à da madeira, o que deve ocorrer quando o adesivo penetra nas cavidades celulares da madeira e se

difunde nas paredes celulares e se torna rígido após a cura (RAYDAN et al, 2021; MORIN-BERNARD et al., 2020). De forma geral, os adesivos empregados devem possuir propriedades compatíveis às condições ambientais a que os elementos estruturais estarão submetidos durante a vida útil (LEITE; SANTOS; VALLE, 2017).

Dentre os adesivos sintéticos, destaca-se aqueles à base de formaldeído, como a ureia, a melamina, o fenol, o resorcinol e o isocianato (OKADA et al., 2020; LIU et al., 2020; GONÇALVES et al., 2019; COSTA et al., 2018). O resorcinol formaldeído pode ser utilizado em elementos estruturais em condições de umidade, além disso, apresenta alta resistência ao cisalhamento (TREU; BREDESEN; BONGERS, 2020; GONÇALVES et al, 2019). O bicomponente melamina ureia formaldeído (MUF) apresenta alta reatividade, tempo de cura rápido, é incolor e possui boa adesão (PARK; JEONG; PARK, 2021).

O apelo ambiental tem levado ao estudo de adesivos livres de compostos orgânicos voláteis tóxicos. Os adesivos derivados do óleo de mamona e de silicatos são alternativas para solucionar este problema (BIANCHE et al., 2022; FARIA et al., 2019a). É possível sintetizar polióis e prepolímeros do óleo extraído da mamona, que quando combinados, a frio, levam à reação de polimerização da mistura que conduz à formação do poliuretano (PARASKAR et al., 2021), com propriedades mecânicas que permitem a colagem de peças para uso estrutural (SEGUNDINHO et al., 2021; FARIA et al., 2020a; BRUNETI et al., 2019).

O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento da adesão da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* com a aplicação dos adesivos estruturais: melamina-ureia-formaldeído (MUF), resorcinol-formaldeído (RF) e poliuretano (PUR).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A madeira utilizada neste estudo é proveniente do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, extraído de árvores adultas plantadas na Região Sudeste do Brasil, fornecidas por uma empresa do norte do Estado do Espírito Santo. As peças serradas – tábuas (secas em estufa) não possuíam nenhum tipo de tratamento preservativo e apresentavam dimensões médias de 2,9 × 9,3 × 310,7 cm (espessura × largura × comprimento).

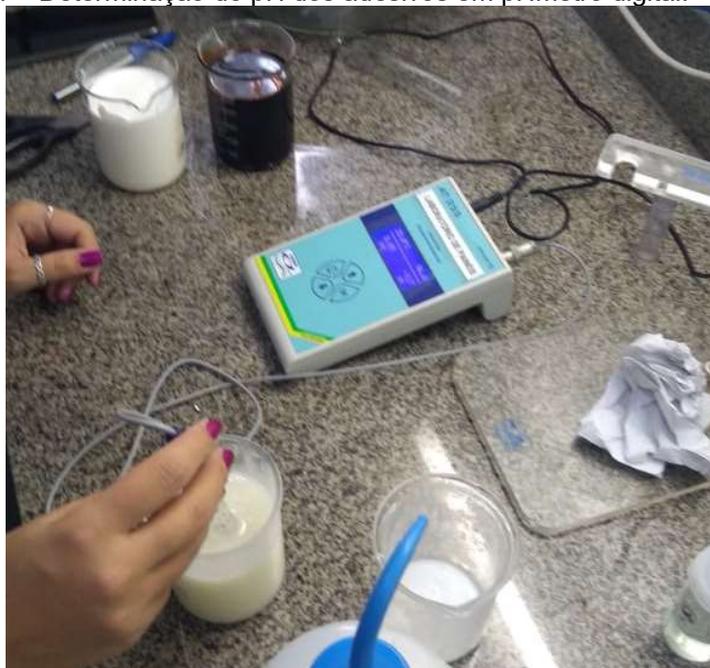
Foram usados três tipos de adesivos comerciais para fabricação das vigas, como: resorcinol-formaldeído (RF), poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona (PUR) e melamina-ureia-formaldeído (MUF). Para aplicação dos adesivos, a seleção do catalisador atendeu à recomendação dos fabricantes dos adesivos, sendo para o resorcinol-formaldeído, aplicado uma proporção 20% de catalisador. Para o poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,2 (pré-polímero:poliol) e para a melamina-ureia-formaldeído foi preparada na proporção 10:2 (resina:catalisador), conforme recomendação do fabricante.

2.2 Caracterização dos adesivos

A caracterização dos adesivos ocorreu antes da fabricação das vigas de MLC. As seguintes propriedades foram estudadas: pH, viscosidade, densidade e teor de sólidos.

O pH indica a concentração de íons dissociados de H^+ e OH^- numa solução aquosa. A determinação do pH foi em um pHmetro digital (Alfakit, AT355), à temperatura de 25 °C, colocando-se o eletrodo diretamente dentro de um béquer contendo 50 g de adesivo (Figura 1).

Figura 1 – Determinação do pH dos adesivos em pHmetro digital.



Fonte: o autor.

A viscosidade pode ser definida como a grandeza que caracteriza a existência de atrito entre as moléculas de um fluido e que se manifesta pelo escoamento. A viscosidade dos adesivos foi determinada de acordo a ASTM D-1084 (ASTM, 2016), por meio de viscosímetro digital (Marte, MVD-8), que mede a força necessária para girar um disco submerso no líquido, à velocidade constante.

Para determinação do teor de sólidos dos adesivos (Figura 2), foi empregado um procedimento adaptado da ASTM D1582-60 (2017). Uma amostra de 10,0 g de adesivo foi pesada em balança de precisão (P1), posteriormente, o material foi levado à estufa a $103 \pm 2^\circ$, até a secagem completa. Após a retirada da estufa, o material foi pesado novamente (P2). O teor de sólido é calculado pela razão entre P2 e P1, em porcentagem.

Figura 2 – Pesagem dos adesivos para obtenção do teor de sólidos.

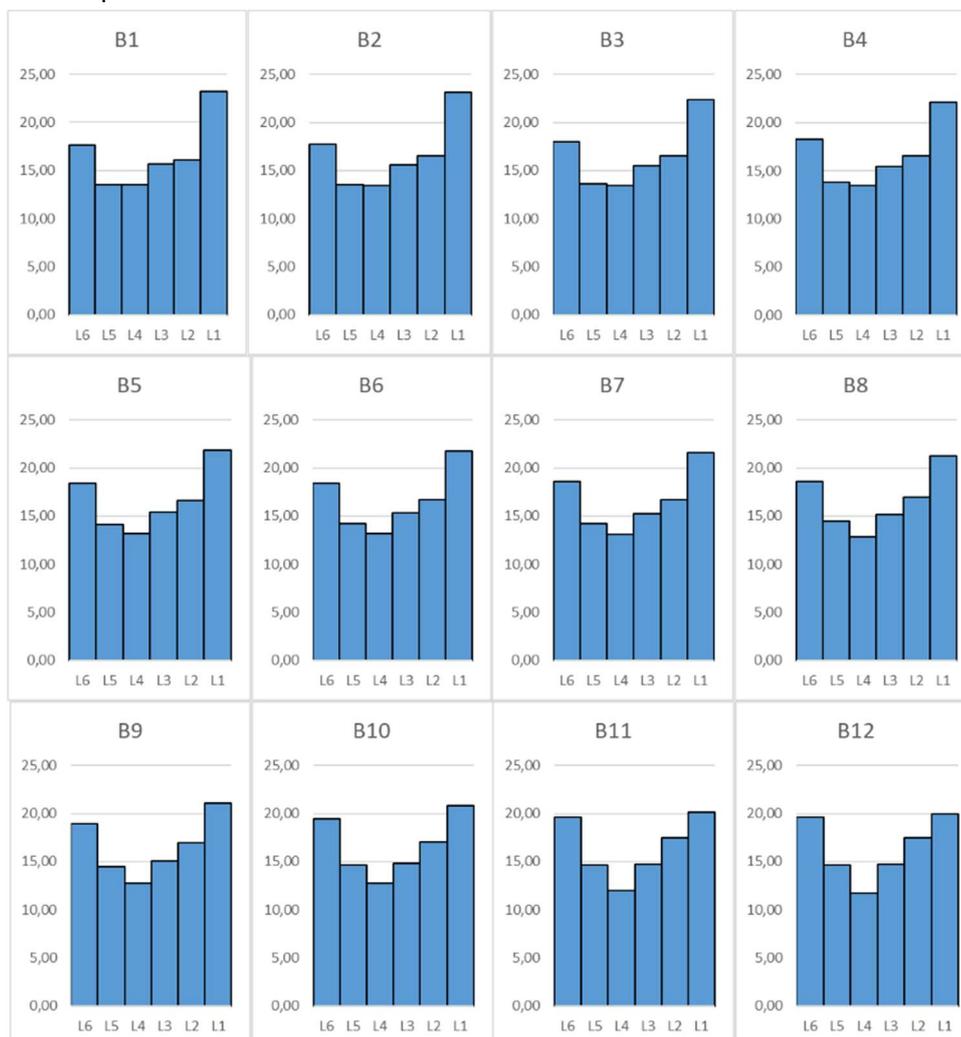


Fonte: o autor.

2.3 Preparo das lamelas e montagem das vigas de madeira lamelada colada (MLC)

As tábuas foram identificadas, pesadas, medidas e classificadas visualmente. De um total de 79 peças avaliadas visualmente, 72 foram consideradas aptas a seguir para caracterização mecânica, realizada por meio de ensaios não destrutivos, conforme apresentado no Capítulo 1. Para cada viga, foram definidas seis lamelas, distribuídas de acordo com o módulo de elasticidade (MOE), obtidas pelo ensaio de flexão estática (Figura 3). O procedimento adotado é denominado balanceamento e segue a recomendação de que as lamelas com MOE's mais elevados sejam dispostas nas regiões mais solicitadas da viga, enquanto as lamelas com MOE's menores devem ser alocadas nas regiões de menor solicitação (ZANGIÁCOMO et al.; 2017).

Figura 3 – Balanceamento das lamelas para fabricação das vigas de MLC, em que L1 é a lamela inferior e L6, a lamela superior.



Fonte: o autor.

Após esta fase, realizou-se a colagem das vigas de MLC, em prensas do Laboratório de Estruturas de Madeira (LEMAD) do Departamento de Ciências Florestais e Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias (CCA) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Os adesivos foram espalhados com uma espátula sobre a superfície das lamelas e sua homogeneidade foi analisada visualmente. Adotou-se gramatura de 300 g.m⁻² com linha dupla de cola controlada por meio de pesagem. A colagem foi com intensidade de pressão igual a 1,0 MPa por período de 48h, em temperatura ambiente (Figura 4).

Figura 4 – Prensagem das vigas de MLC feita no Laboratório de Estruturas de Madeira da UFES.



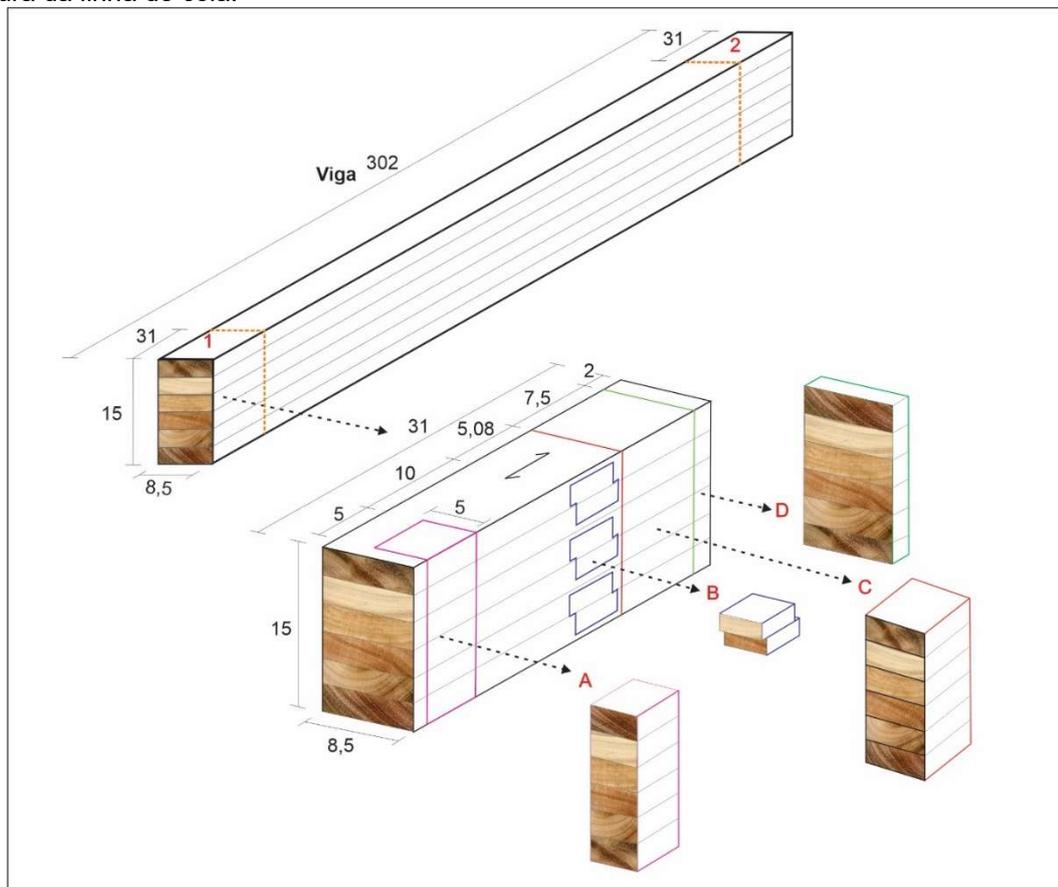
Fonte: o autor.

No total, foram produzidas 12 vigas de MLC, sendo subdivididas em três tratamentos, dependendo do adesivo aplicado na colagem, sendo estes: Poliuretano (PUR), Resorcinol-formaldeído (RF), e Melamina-ureia-formaldeído (MUF), com quatro repetições.

2.4 Retirada dos corpos de prova

Para a execução de ensaios destrutivos foi necessário retirar corpos de prova das vigas de MLC. Para tanto, utilizou-se as duas extremidades das vigas, com comprimento de 31 cm para a obtenção dos corpos de prova para os ensaios de densitometria e resistografia, resistência ao cisalhamento na linha de cola, delaminação e mensuração da linha de cola. O esquema de retirada dos corpos de prova é apresentado na Figura 5. A Tabela 1 consta a quantidade de corpos de prova utilizados para os ensaios.

Figura 5 – Esquema de retirada dos corpos de prova das vigas de MLC: (A) densitometria e resistografia, (B) resistência ao cisalhamento na linha de cola, (C) delaminação e (D) mensuração da espessura da linha de cola.



Fonte: o autor.

Tabela 1 – Quantidade de corpos de prova para realização dos ensaios (A) densitometria e resistografia, (B) resistência ao cisalhamento na linha de cola, (C) delaminação e (D) mensuração da espessura da linha de cola.

| Ensaio | Quantidade de corpos de prova | |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------|
| | seco | saturado |
| (A) Densitometria/Resistografia | 24 | - |
| (B) Cisalhamento na linha de cola | 36 | 36 |
| (B) Delaminação | 24 | - |
| (C) Espessura da linha de cola | 24 | - |

2.5 Cisalhamento na linha de cola e falha na madeira

No ensaio de cisalhamento na linha de cola (Figura 6) foi realizado para a avaliação da qualidade da colagem, com corpos de prova obtidos a partir das vigas de MLC produzidos de acordo com a ASTM D905-08 (2021), para as condições seca

e saturada. Os corpos de prova de cisalhamento na linha de cola foram retirados conforme esquema apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 6 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola feito na máquina universal da Emic.



Fonte: o autor.

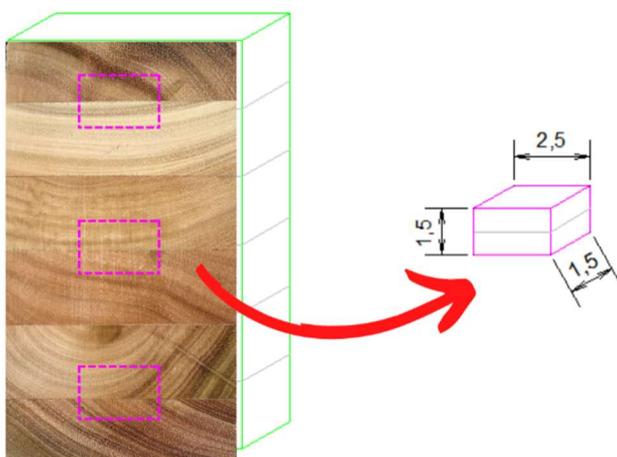
O percentual de falha na madeira foi obtido com emprego de uma malha reticulada (10 linhas x 10 colunas) impressa em uma folha de acetato de celulose (transparência), a qual é sobreposta sobre a área cisalhada, conforme preconizado pela D5266-13 (2020).

2.6 Mensuração da espessura da linha de cola por fotomicrografia

Para a avaliação do desempenho da adesão é importante avaliar a imagem da linha de cola e verificar medidas de espessura que permitem inferir sobre a penetração do adesivo na madeira e a condição física da linha de cola formada. O estudo das linhas de colas das vigas de MLC foi com a técnica de aquisição de imagens por varredura a laser, em um microscópio confocal (Olympus *Lext 3D Measuring Laser OLS5100*). Para aquisição dos dados e aferição das espessuras das linhas de cola principal e secundária, utilizou-se o *software Analisis application Lext*.

Para cada tratamento, foram retirados três corpos de prova, localizados nas linhas neutras, nas lamelas superior e inferior. Os corpos de prova possuíam dimensões de $2,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ cm}^3$, Figura 7. Os corpos de prova foram fervidos em água destilada, e em seguida, a face a ser analisada no microscópio foi cortada no micrômetro com o objetivo de promover a limpeza da superfície e melhorar a visualização no equipamento (Figura 8).

Figura 7 – Corte dos corpos de prova para mensuração da linha de cola utilizando o microscópio confocal.



Fonte: o autor.

Figura 8 – Aquisição de imagens para mensuração da linha de cola utilizando o microscópio confocal.



Fonte: o autor.

2.7 Delaminação

A delaminação da linha de cola foi avaliada conforme os procedimentos do método B da EN 391 (2001). A retirada dos corpos de prova das vigas de MLC é ilustrada na Figura 7. Antes de iniciar o ensaio, foi realizada a medição do comprimento total de todas as linhas de cola na face frontal e posterior dos 24 corpos de prova. Os corpos de prova foram colocados em autoclave, expondo as faces a serem analisadas a tensões sob vácuo de $77,5 \pm 10$ kPa, durante 30 minutos.

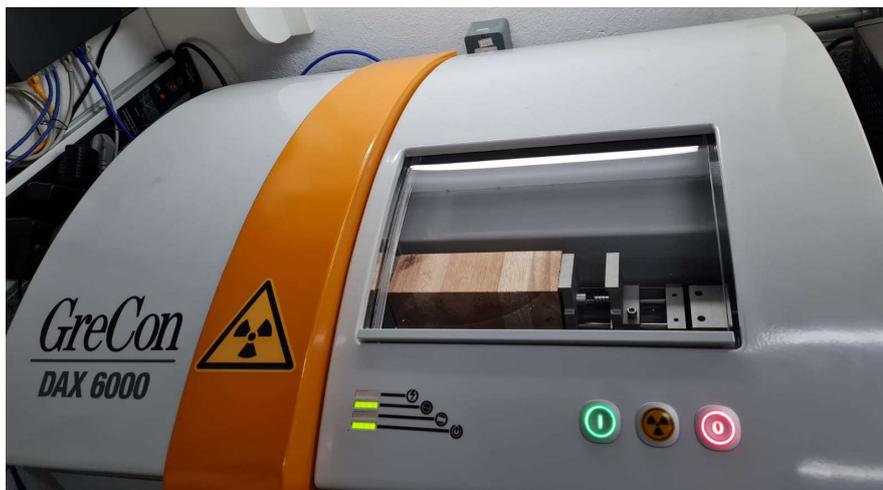
Após a liberação do vácuo, aplicou-se água com pressão de 550 ± 10 kPa, durante 2 horas. Após o ciclo único, os corpos de prova foram retirados da autoclave e passaram por um período de secagem de 15 horas, em estufa, a uma temperatura de 70°C. Ao final do ensaio, as aberturas da linha de cola foram mensuradas novamente, desconsiderando as delaminações das laterais dos corpos de prova. A porcentagem de delaminação é dada pelo comprimento de cada linha de cola em que ocorreu delaminação, dividido pelo comprimento total da linha de cola. De acordo com o método adotado, a delaminação máxima permitida é de 4%.

2.8 Microdensitometria de Raio X

A metodologia de obtenção de perfis de densidade aparente utilizadas comumente para painéis (GONÇALVES et al., 2018) foi empregada para análise dos perfis de corpos de prova das vigas de MLC. Inicialmente, as dimensões e a massa do corpo de prova são inseridas no *software* conectado ao equipamento. Os corpos de prova foram alocados no porta-amostras no compartimento interno blindado do microdensitômetro de Raio X (Grecon, DAX 6000, Alemanha) (Figura 9).

As medições foram realizadas por meio do transdutor de medição otimizado, composto por uma combinação de Raio X, com velocidade de 0,1 até 1 mm.s⁻¹. O equipamento possui sistema de aquisição de dados que gera os perfis de densidade de forma automatizada.

Figura 9 - Microdensitômetro de Raio X marca Grecon modelo DAX 6000, com corpo de prova em seu interior.



Fonte: o autor.

2.9 Resistência à perfuração

Os corpos de prova para o ensaio de resistência à perfuração foram retirados e possuem as seguintes dimensões de 15 × 8,5 × 5 cm. Estes foram alocados no resistógrafo R650-SC (RINNTECH, R650-SC, Alemanha) (Figura 10), no qual utilizou-se para as microperfurações hastes de aço com 1,5 mm de diâmetro e 3 mm em sua ponta (aresta de corte).

Figura 10 - Ensaio de resistência à perfuração com resistógrafo R650-SC.



Fonte: o autor.

Ao iniciar a perfuração, a haste de aço é inserida no corpo de prova com velocidade de avanço constante. Ao atravessar a amostra, a haste encontra diferentes resistências à perfuração que são referentes às características anatômicas da madeira e, ou, do adesivo na linha de cola. A medição registrada pelo equipamento é denominada de amplitude e é expressa em porcentagem. A amplitude registrada pontualmente na memória interna do equipamento refere-se ao consumo de energia

eletrônica do motor rotativo para vencer a resistência à perfuração na madeira em relação a um valor de referência do aparelho (KLOPPENBURG, 2018; LIMA et al., 2007).

A resistografia é apoiada no princípio de que, a resistência à perfuração está diretamente relacionada à densidade do material que está sendo testado. Este método foi originalmente desenvolvido para caracterizar a variação da densidade radial dentro de uma árvore possivelmente danificada por agentes degradadores e para inspeção de estruturas de madeira, como relatado por Papandrea et al. (2020), Wu et al. (2018), Nowak, Jasienko e Hamrol-Bielecka (2016). Entretanto, o método apresenta restrições de aplicabilidade na avaliação da densidade da madeira, tendo em vista que se deve considerar o efeito do atrito durante a perfuração. Estudos indicam que, à medida que a broca agulha corta a madeira, os cavacos de madeira podem se acumular dentro do canal de corte e causar atrito no eixo da agulha, o que leva a um aumento na resistência à perfuração (SHARAPOV; WANG; SMIRNOVA, 2017; NUTTO; BIECHELE, 2015).

Para amenizar este efeito de atrito, duas direções de perfuração opostas foram realizadas no resistógrafo para a análise da resistência das lamelas nos perfis, reduzindo erros de leitura e considerando a região específica da perfuração. Para a elaboração dos perfis de resistência à perfuração, adotaram-se os valores médios obtidos nas duas direções.

Os dados da memória do resistógrafo foram exportados e convertidos em arquivos com extensão compatível ao *software* EXCEL. Para análise, os dados foram padronizados, simplificados e representados em porcentagem (SHARAPOV et al., 2019; OLIVEIRA, WANG, VIDAURRE 2017).

2.10 Análise estatística

As análises estatísticas foram consideradas em delineamento inteiramente casualizado (DBC), considerando três tratamentos de acordo com a aplicação do adesivo para colagem das vigas de MLC (PUR, RF e MUF). O teste de Henze-Zirkler foi utilizado para verificar a normalidade multivariada dos dados. Optou-se pela análise multivariada de variância por essa fornecer uma única análise para todas as variáveis (JOSEPH et al., 2009). Os seguintes pressupostos para a aplicação de análise de variância multivariada foram testados, a ausência de *outliers* multivariados,

homogeneidade das matrizes de covariância e variância e ausência de multicolinearidade ($R < 0,90$).

A ausência de *outliers* foi verificada pelo cálculo da distância de Mahalanobis ($p < 0,01$). Para verificação da homogeneidade das matrizes de covariância e variância, utilizou-se o teste de Box. Para verificar a ausência de multicolinearidade, adotou-se a correlação de Pearson, em que a correlação entre as variáveis deve ser inferior a 0,90.

A análise de variância foi empregada para verificar o efeito dos tipos de adesivos empregados sobre a resistência ao cisalhamento na linha de cola e a falha na madeira, com aplicação do teste de lambda de Wilks ($p < 0,05$). A comparação entre médias foi pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados foram processados e analisados no *software* R (R Core Team, 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos adesivos

Para as vigas de MLC, tanto a resistência inicial das juntas coladas como a estabilidade destas, durante a vida útil do produto, são essenciais para o bom funcionamento do elemento colado. Dentre os parâmetros avaliados para verificar a colagem das peças, tem-se as propriedades reológicas dos adesivos empregados (IŽDINSKÝ et al., 2021). As características encontradas para os adesivos PUR, REF e MUF constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos adesivos pH, viscosidade, densidade e teor de sólidos dos adesivos PUR Componente A: poliol, PUR Componente B: pré-polímero, RF: Resorcinol-formaldeído, MUF: Melamina-ureia-formaldeído

| Adesivo | Propriedades | | | | |
|---------|--------------|---------------------|------------------------------------|------------------------|-------|
| | pH | Viscosidade (cP) | Densidade (g.cm ⁻³) | Teor de sólidos (%) | |
| PUR | Comp. A | 6,35 | 404,96 | 1,46 | 90,77 |
| | Comp B | 6,50 | 475,47 | 1,29 | 97,38 |
| | RF | 7,25 | 508,24 | 1,31 | 62,52 |
| | MUF | 9,05 | 11690 | 1,67 | 63,97 |

O pH do adesivo deve ser semelhante ao da madeira para garantir melhor qualidade na linha de cola. Adesivos com pH muito baixo podem ocasionar espuma

na mistura e por consequência, prejudicar a colagem (SILVA et al., 2019). Além disso, os valores de pH devem estar dentro da faixa de 2,5 a 11,00, este limite deve ser respeitado para que o adesivo não cause degradação das fibras da madeira (SILVA et al., 2019; ALBUQUERQUE; IWAKIRI; KEINERT JUNIOR, 2005). O pH dos adesivos estudados permaneceu dentro da faixa sugerida e apresentou resultados semelhantes à literatura (BIANCHE et al., 2022; KAWALERCZYK et al., 2020; FARIA et al., 2019a; SEGUNDINHO et al., 2017).

Na caracterização da MUF utilizada na colagem das peças de madeira de *Eucalyptus cloeziana*, Segundinho et al. (2017) encontraram valores semelhantes para pH e viscosidade, respectivamente 9,70 e 10.861cP. O PUR apresentou menor viscosidade em relação ao RF e MUF, característica que proporciona melhor espalhamento sobre a superfície da madeira, e conseqüentemente, contribui para maior penetração do adesivo e sua absorção pela madeira (BIANCHE et al., 2017). Entretanto, em situação extrema, pode levar a linha de cola denominada “faminta”, o que ocasiona menor resistência ao cisalhamento (SETTER et al., 2021; GONÇALVES et al., 2019).

Os resultados obtidos para densidade dos adesivos variaram de 1,29 a 1,67 g.cm⁻³, os quais condizem com os valores encontrados na literatura (KAWALERCZYK et al., 2020; DONADON et al., 2020; SEGUNDINHO et al., 2017). O teor de sólidos é a fração do adesivo que polimeriza após a prensagem da madeira (DANIELLI et al., 2021). Esta propriedade oscilou de forma considerável entre o PUR e os demais adesivos. Um teor de sólidos elevado contribui para a qualidade da linha de cola, melhorando a adesão entre a madeira e o adesivo (MARCHESAN et al., 2018).

3.2 Cisalhamento na linha de cola e falha na madeira

Os resultados obtidos para cisalhamento na linha de cola e falha na madeira para os três tipos de adesivos empregados neste estudo são apresentados na Tabela 3, para as condições seca e saturada. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Henze-Zirkler, a 5% de significância. Diante do atendimento de todos os pressupostos, a análise de variância multivariada foi aplicada.

Tabela 3 – Resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira para as condições seca e saturada.

| Condição seca | | | |
|-------------------|---------------------|----------------------|-------------|
| Adesivo | $f_{v0,m}$ (MPa) | Falha na madeira (%) | Umidade (%) |
| PUR | 11,50 a * (2,68)*** | 95,20 a (6,80) | 10,79 |
| RF | 11,70 a (3,22) | 84,90 a (9,10) | 10,56 |
| MUF | 9,38 a (1,88) | 69,90 b (27,41) | 10,41 |
| Condição saturada | | | |
| Adesivo ** | $f_{v0,m}$ (MPa) | Falha na madeira (%) | Umidade (%) |
| PUR | 5,88 a (1,72) | 62,80 a (31,63) | 98,62 |
| RF | 6,04 a (2,19) | 76,00 a (25,75) | 92,73 |
| MUF | 5,78 a (2,53) | 73,60 a (29,19) | 97,34 |

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Wilks, $p > 0,05$); ** PUR: Poliuretano; RF: Resorcinol-formaldeído; MUF: Melamina-ureia-formaldeído; $f_{v0,m}$: resistência ao cisalhamento na linha de cola; *** desvio padrão.

Observa-se na Tabela 3 que não houve diferença estatística nos resultados obtidos para a resistência ao cisalhamento na linha de cola, na condição seca. Os resultados obtidos para falha na madeira, na condição seca, apresentaram diferença estatística. Para o adesivo MUF houve menor porcentagem de falha na madeira do que no PUR e RF. Para a condição saturada, não houve diferença estatística para a falha na madeira de acordo com o adesivo empregado.

Observa-se que tanto para condição seca quanto saturada, os percentuais médios para falha na madeira foram superiores ao valor mínimo de 60%, preconizados pela ASTM D-5751 (ASTM, 2005). Além disso, o PUR na condição seca e o RF nas condições secas e saturadas apresentaram resultados superiores a 75%, conforme indicado pela ASTM D-2559 (2018).

Portanto, os resultados obtidos para falha na madeira indicam uma boa qualidade de adesão, o que demonstra que a coesão do adesivo e a resistência da interface madeira-adesivo são mais altas que a resistência da madeira. Por outro lado, baixos percentuais de falha na madeira sugerem que a aplicação da madeira não está sendo otimizada em consonância com o adesivo, tendo em vista que a ruptura ocorre com baixas tensões em relação à resistência da madeira (AICHER; AHMAD; HIRSCH, 2018; BIANCHE et al., 2017).

No estudo desenvolvido para avaliar a resistência ao cisalhamento na linha de cola de juntas de *Eucalyptus* sp. coladas com diferentes adesivos de cura a frio (RF, silicato de sódio, PVA - acetato de polivinila e PUR), verificou-se que não houve

diferença significativa entre os adesivos estudados, exceto o adesivo à base de silicato de sódio, que apresentou os menores valores de resistência (BIANCHE et al., 2017).

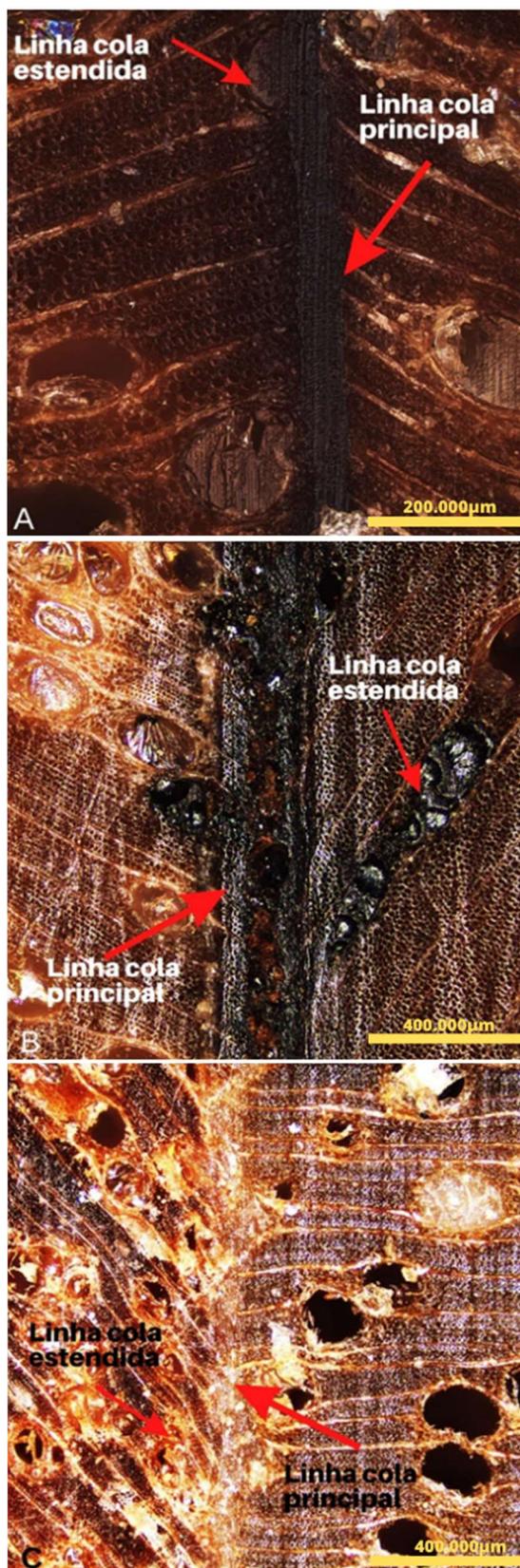
Nos ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira de *Eucalyptus cloeziana*, tratada quimicamente Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), para os adesivos RF (11,64 MPa), PUR (11,44 MPa) e MUF (8,29 MPa), não houve diferença significativa dos valores obtidos (SEGUNDINHO et al, 2017). Tais resultados são semelhantes aos apresentados neste estudo.

O comportamento mecânico de madeira lamelada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo PUR foi avaliado quanto à resistência ao cisalhamento da linha de cola e falha na madeira para condição seca e saturada (FARIA; MENDES, GUIMARÃES JUNIOR, 2020). A resistência média ao cisalhamento da linha de cola, na condição seca, foi de 39,47% superior à condição saturada. A falha na madeira para a condição seca e saturada obtidas foram, respectivamente, de 92,5% e 75%.

3.3 Mensuração da espessura da linha de cola

A Figura 11 ilustra a interface madeira – adesivo no plano longitudinal das juntas coladas de madeira do híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* para os adesivos PUR, RF e MUF.

Figura 11 – Fotomicrografias da interface madeira – adesivo no plano longitudinal das juntas coladas de madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* para os adesivos PUR (A), RF (B), MUF (C).



Fonte: o autor.

Foi possível verificar que houve penetração dos adesivos na estrutura anatômica da madeira, em particular, nos elementos de vasos e raios. Essa condição garante maior resistência na interface madeira-adesivo. Nas fotomicrografias realizadas, as linhas de cola estendidas para os corpos de prova colados com RF foram maiores. Os resultados obtidos para resistência ao cisalhamento da linha de cola para o RF foram maiores que para PUR e MUF, para ambas as condições de umidade.

Houve diferença significativa nas médias de espessuras das linhas de colas para os diferentes adesivos. A maior média de espessura da linha de cola (129,5 μm) foi obtida com o adesivo RF. As médias de espessura de linha de cola dos adesivos PUR e MUF foram, respectivamente, 66,9 e 49,8 μm . A viscosidade dos adesivos pode explicar a diferença encontrada entre estes. Quanto maior a viscosidade do adesivo, maior sua dificuldade de espalhamento, o que é causado pela menor fluidez, resultando em menor penetração do adesivo na estrutura capilar da madeira (BIANCHE et al., 2017). Uma penetração eficiente do adesivo na madeira está associada a condições de molhabilidade do adesivo (CHANDLER; BRANDON; FRIHART, 2005).

3.4 Delaminação

A eficiência dos adesivos quando submetidos a variações de umidade, pressão e temperatura deve ser verificada para garantir a funcionalidade estrutural do elemento de MLC durante sua vida útil (FARIA et al, 2019b). Os resultados obtidos para o ensaio de delaminação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios encontrados para o ensaio de delaminação na madeira.

| Adesivo | Delaminação (%) | Mínimo (%) | Máximo (%) |
|----------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| PUR | 16,3 a | 6,69 | 25,61 |
| RF | 2,57 b | 0,00 | 6,98 |
| MUF | 12,2 a | 0,91 | 27,18 |

O ensaio de delaminação realizado mostrou que os corpos de prova colados com RF apresentaram os melhores resultados para delaminação na linha de cola, atendendo aos pressupostos estabelecidos pela EN 391 (2013) para o método B. Os

resultados favoráveis obtidos para o adesivo podem ser ocasionados pela maior penetração na madeira e boa resistência à umidade (OLIVEIRA et al., 2020).

A eficiência da linha de cola foi avaliada por meio de ensaio de delaminação para elementos de MLC de *Eucalyptus* sp. fabricados com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído (RFF) e poliuretano (PUR) (SEGUNDINHO et al., 2018). Os valores médios de delaminação obtidos para RFF e PUR foram 5,02% e 34,40%. Os autores consideram que os resultados podem estar associados à menor espessura da linha de cola do PUR e maior espessura de linha de cola do RFF. No presente estudo, pode ter havido influência da linha de cola, já que as maiores médias para espessura de linha de cola foram obtidas para o adesivo RF.

3.5 Microdensitometria de Raio X e resistência à perfuração

Os valores médios de densidade aparente das vigas de MLC, obtidos pelo método de densitometria de Raio X e a resistência à perfuração pelo resistógrafo, para cada tratamento (MUF, PUR e RF) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios de densidade aparente e de resistência à perfuração das vigas de MLC.

| Tratamento | Densidade aparente (g.cm ⁻³) | | | Resistência à perfuração (%) |
|------------|--|------|---------|------------------------------|
| | Densitometria de Raio x) | | | |
| | Min | Max | Média* | |
| PUR | 0,04 | 1,03 | 0,624 a | 103,40 a |
| RF | 0,22 | 1,23 | 0,678 b | 115,20 b |
| MUF | 0,28 | 1,11 | 0,672 b | 115,44 b |

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $p > 0,05$). Em que: PUR: Poliuretano; RF: Resorcinol-formaldeído; MUF: Melamina-ureia-formaldeído.

Não foi observada diferença significativa entre os tratamentos RF e MUF, na análise da densidade aparente e da resistência à perfuração. Apesar da madeira empregada na fabricação das vigas de MLC ser do mesmo lote, estas podem apresentar variações de suas características anatômicas (CARRILLO et al., 2022), o que pode explicar a diferença significativa entre os resultados do PUR e os demais adesivos.

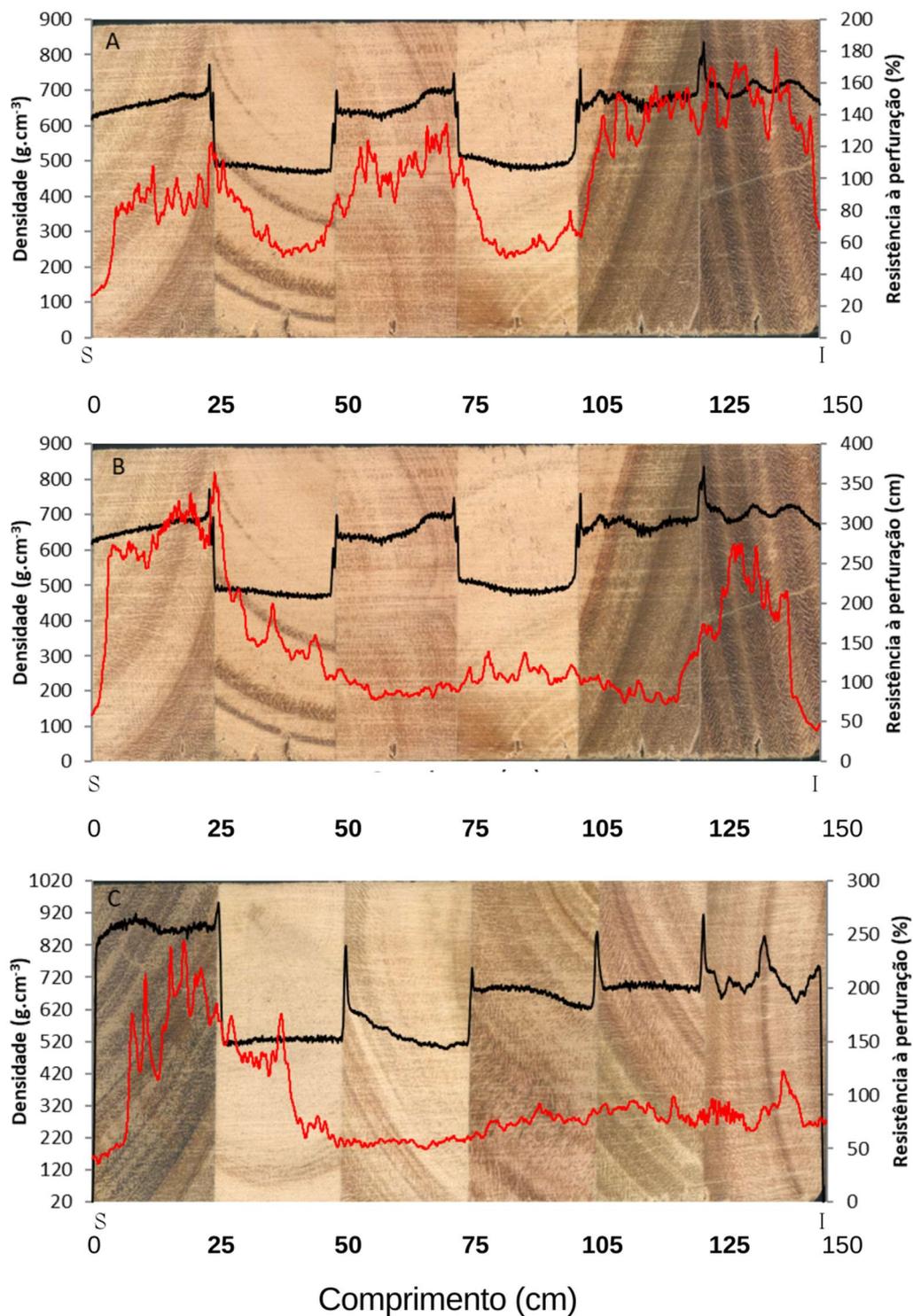
A microdensitometria de Raio X é comumente usada para a análise de perfis de densidade aparente em painéis de partículas (BRITO; BORTOLETTO JUNIOR;

SURDI, 2021; MARTINS et al., 2021; GONÇALVES et al., 2018). O emprego desta técnica para MLC permitiu a análise dos perfis de densidade da madeira, com picos de densidade nos pontos em que há presença de adesivo, elemento que apresenta densidade superior à madeira.

Os perfis de densitometria e resistência à perfuração para os adesivos estudados são apresentados na Figura 12. Nos perfis de densitometria é possível observar os picos de densidade das linhas de cola. Em contrapartida, as linhas de cola não oferecem resistência à perfuração. Quanto às lamelas, observa-se que os perfis de densidade e resistência à perfuração seguem padrões semelhantes. Tal comportamento pode ser visualizado pelas regiões com os maiores picos nas medidas de densidade (desconsiderando-se as linhas de cola).

Os perfis representam a configuração utilizada para o balanceamento das vigas de MLC, em que as lamelas com resistência mais elevada são dispostas nas regiões externas superior e inferior, onde há maior solicitação de esforços na viga. Portanto, os perfis de densidade e resistência à perfuração permitem uma análise confiável da estrutura dos elementos em MLC e podem ser empregados como métodos de avaliação no controle de qualidade desse tipo de estrutura.

Figura 12 – Perfis de densidade aparente obtido por densitometria de Raio x (em preto) e de resistência à perfuração (em vermelho) dos elementos em MLC para os adesivos PUR (A), RF (B), MUF (C). S indica lamela superior e I, lamela inferior da viga.



Fonte: o autor.

4 CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados, concluiu-se que os adesivos PUR, RF e MUF podem ser empregados na fabricação de MLC. Para a condição seca, não houve diferença estatística entre os adesivos quanto à resistência na linha de cola.

Os percentuais médios para falha na madeira foram superiores ao valor mínimo recomendado tanto para condição seca quanto saturada. Especificamente, o PUR na condição seca e o RF nas condições seca e saturada apresentaram resultados que indicam sua aplicação em peças estruturais.

As fotomicrografias permitiram concluir que houve penetração dos adesivos na estrutura anatômica da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. O adesivo RF apresentou maior espessura de linha de cola e as imagens mostraram claramente a penetração do adesivo por meio das linhas de cola estendidas.

De forma geral, o RF apresentou características melhores na colagem, quando se analisa a resistência ao cisalhamento, a falha na madeira e a delaminação. Sendo este adesivo indicado para uso estrutural em ambientes úmidos.

Os métodos de densitometria de Raio X e resistência à perfuração podem ser empregados como métodos de avaliação no controle de qualidade de estruturas em MLC.

5 REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S.; QUESADA, H.; BOND, B.; HAMMETT, T. Potential of hardwood lumber in cross laminated timber in North America: A CLT Manufacturer's Perspective. **Mass Timber Construction Journal**, v. 3, n. 1, p. 1-9, 2020.

AICHER, S.; AHMAD, Z.; HIRSCH, M. Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, n. 4, p. 1205-1222, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1305-0>

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 509-516, set. 2010.

ALBUQUERQUE, C. E. C. IWAKIRI, S.; KEINERT JUNIOR, S. **Adesivos e adesão**. In: IWAKIRI, S. (Ed.). Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: FUPEF, p. 1-30, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1084**: standard test methods for viscosity of adhesives. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2016. 5p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1582**: Standard test method for nonvolatile content of liquid phenol, resorcinol, and melamine adhesives. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM. D905-08**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Annual Book of ASTM Standards . West Conshohocken, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM. D5266-13**: Standard practice for estimating the percentage of wood failure in adhesive bonded joints. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D5751 – 99**: (rev 2005): Standard specification for adhesives used for laminate joints in nonstructural lumber products. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2005. 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D2559**: Standard specification for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, 2018.

BARROS, D. L.; REZENDE, F. A.; CAMPOS, A. T. Production of *Eucalyptus urograndis* plants cultivated with activated biochar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, p. 1-6, 2019. DOI:10.5039/agraria.v14i2a5649

BIANCHE, J. J.; CARNEIRO; A. D. C. O.; VITAL, B. R.; DE ANDRADE, B. G.; GOMES, R. M.; ARAÚJO, S., SOUZA, E. C. Improving the understanding of wood bonding: behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 112, p. 102987, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102987>

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.077114>

BRITO, F. M. S.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; SURDI, P. G. Properties of particleboards made from sugarcane bagasse particles. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 1, p. 1-7, 2021. <https://doi.org/10.5039/agraria.v16i1a8783>

BRUNETTI, M.; CHRISTOVASILIS, I. P., MICHELONI, M., NOCETTI, M., PIZZO, B. Production feasibility and performance of carbon fibre reinforced glulam beams manufactured with polyurethane adhesive. **Composites Part B: Engineering**, v. 156, p. 212-219, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.075>

BUKHARI, M. D.; GOHAR, G. A.; AKHTAR, A., ULLAH, S.; AKRAM, M.; ABID, J.; RAZA, H. Adhesion theories and effect of surface roughness on energy estimation and wettability of polymeric composites bonded joints: a-review. **VW Applied Sciences**, v. 2, n. 1, p. 74-86, 2020. <http://js.vallway.com/index.php/applied-sciences/article/view/37>

CARRILLO, I.; VIDAL, C.; ELISSETCHE, J. P.; MENDONÇA, R. T. Wood anatomical and chemical properties related to the pulpability of *Eucalyptus globulus*: a review. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 80, n. 1, p. 1-8, 2018. <http://dx.doi.org/10.2989/20702620.2016.1274859>

CHANDLER, J. G.; BRANDON, R. L.; FRIHART, C. R. Examination of adhesive penetration in modified wood using fluorescence microscopy. In: **ASC Spring 2005 Convention and Exposition**: April 17-20, Columbus, OH.[Bethesda, Md.: Adhesive and Sealant Council, 2005]: 10 p. 2005.

COSTA, B. V.; CHAHUD, E.; VAZ, J. V. Q.; DE MAGALHÃES, L. N.; NEVES, P. L. Resistência ao cisalhamento do *Eucalyptus grandis* com a utilização de adesivos à base de resina menanina e uréia e à base de emulsão acrílica polimerizada com isocianato. **Construindo**, v. 10, n. 1, p. 92-99, 2018.

DANIELLI, D.; PIRES, M. R.; DA SILVA ARAUJO, E.; LORENÇO, M. S.; MORI, F. A. Application of *Myrcia splendens* tannins in the composition of urea-formaldehyde adhesive for sustainable wood bonding. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e370101220543-e370101220543, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20543>

DIESTCH, P.; TANNERT, T. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. **Construction and building materials**, v. 101, n. 2, p. 1259-1270, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.064>

DONADON, B.; MASCIA, N. T.; VILELA, R.; TRAUTWEIN, L. M. Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, v. 202, p. 109818, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109818>

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 391**: Glued laminated timber: delamination test of glue lines. Brussels: EN, 2001.

ESPINOZA, O.; BUEHLMANN, U. Cross-laminated timber in the USA: opportunity for hardwoods? **Current Forestry Reports**, v. 4, n. 1, p. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0071-x>

FARIA, D. L.; CRUZ, T. M.; MESQUITA, L.; DUARTE, P. J.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES, J. B. Number of laminae on the mechanical behavior of glued laminated timber (glulam) of *Toona ciliata* produced with vegetable polyurethane adhesive. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2019a. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943014819>

FARIA, D. L.; RIBEIRO, L. P.; OLIVEIRA, K. M.; JÚNIOR, J. B. G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (PLP) produzidos com madeira de *Hevea brasiliensis*. **Revista Ciência da Madeira**, v. 10, n. 3, 2019b. <http://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v10n3p247-254>

FARIA, D. L.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo poliuretano. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. 1-11, 2020a. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.11>

FARIA, D. L.; SCATOLINO, M. V.; LOPES, T. A.; MESQUITA JÚNIOR, L.; MOTA, G. D. S.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; SORIANO, J. Performance of glulam beams produced with free-formaldehyde adhesive and underexploited rubber wood treated with preservatives solutions of chromated copper borate and pyrethroids. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 34, n. 11, p. 1145-1162, 2020b. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1700075>

GLAVINIC, I. U.; BOKO, I.; TORIC, N.; VRANKOVIC, J. L. Application of hardwood for glued laminated timber in Europe. **Journal of the Croation Association of Civil Enginners**, v. 72, n. 7, p. 607-616, 2020. <https://doi.org/10.14256/JCE.2741.2019>

GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G.; PAES, J. B.; CHAVES, I. L. S.; MARTINS, R. S. F.; SANTIAGO, S. B., OLIVEIRA, J. G. L. Eficiência da colagem em madeira de kiri japonês (*Paulownia tomentosa*). **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, p. 95-102, 2019. <https://doi.org/10.5965/223811711812019095>

GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; CARVALHO, A. M. D.; TOMAZELLO FILHO, M. Densitometria de raios x na avaliação da densidade em painéis de partículas. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 1151-1162, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509833382>

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Bookman editora, 2009.

IŽDINSKÝ, J.; REINPRECHT, L.; SEDLIACIK, J.; KÚDELA, J.; KUCEROVÁ, V. Bonding of selected hardwoods with PVAc adhesive. **Applied Sciences**, v. 11, n. 1, p. 67, 2020. <https://dx.doi.org/10.3390/app11010067>

KAWALERCZYK, J.; SIUDA, J.; MIRSKI, R.; DZIURKA, D. Hemp flour as a formaldehyde scavenger for melamine-urea-formaldehyde adhesive in plywood production. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 4052-4064, 2020.

KLOPPENBURG, A. M. **Density determination of tropical hardwoods with the Resistograph**. 84 f. 2018. Thesis (Master of Science in Materials Science and Engineering) - Delft University of Technology, Delft, 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, p. 120355, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120355>

LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M; VALLE, I. M. R. O uso da madeira lamelada colada no Brasil: panorama e desafios. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 2, 2017, Buenos Aires, **Anais** [...]. Buenos Aires: Universidad Nacional Noroeste, 2017. p. 1-12.

LIMA, J. T.; SARTÓRIO, R. C.; TRUGILHO, P. F.; DA CRUZ, C. R.; SILVA VIEIRA, R. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Florestalis**, n. 75, p. 85-93, 2007.

LIU, J.; YUE, K.; XU, L.; WU, J.; CHEN, Z.; WANG, L.; LU, W. Bonding performance of melamine-urea-formaldehyde and phenol-resorcinol-formaldehyde adhesive glulams at elevated temperatures. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 98, p. 102500, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102500>

MARCHESAN, R.; LOIOLA, P. L.; MELLO, T. V. D.; ROCHA, M. P. D.; SILVA, J. R. M. D. Technological feasibility of *Hovenia dulcis* thunb. species for the production of edge glued panels. **Floresta e Ambiente**, v. 25, 2018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.005816>

MARTINS, R. S. F.; GONCALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G. A.; LELIS, R. C. C.; PAES, J. B.; LOPEZ, Y. M.; OLIVEIRA, R. G. E. Investigation of agro-industrial lignocellulosic wastes in fabrication of particleboard for construction use. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102903, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102903>

MORIN-BERNARD, A.; BLANCHET, P.; DAGENAIS, C.; ACHIM, A. Use of northern hardwoods in glued-laminated timber: A study of bondline shear strength and resistance to moisture. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 5, p. 891-903, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01572-3>

MOYA, L.; PÉREZ GOMAR, C.; VEGA, A.; SÁNCHEZ, A.; TORINO, I.; BAÑO, V. Relación entre parámetros de producción y propiedades estructurales de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis*. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 21, n. 3, p. 327-340, 2019. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000305>

NOWAK, T. P.; JASIEŃKO, J.; HAMROL-BIELECKA, K. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method—Evaluation of usefulness. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 403-415, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.004>

NUTTO, L.; BIECHELE, T. Drilling resistance measurement and the effect of shaft friction—using feed force information for improving decay identification on hard tropical wood. In: **Proceedings of the 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium**, Rio de Janeiro. 2015. p. 22-25.

OKADA, T.; KOBORI, H.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S.; NISHIKIDO, K.; HIROSE, A.; TAKAHASHI, K. Evaluating the durability of structural glulam bonded with aqueous

polymer-isocyanate adhesive by two kinds of accelerated aging treatments. **European Journal of Wood and Wood products**, v. 78, n. 1, p. 113-122, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01485-w>

OLIVEIRA, R. G. E; GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G. D. A.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; PAES, J. B.; CHAVES, I. L.; BRITO, A. S. Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* glulam. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 22, n. 4, p. 495-504, 2020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000408>

OLIVEIRA, J. T.; WANG, X.; VIDAURRE, G. B. Assessing specific gravity of young Eucalyptus plantation trees using a resistance drilling technique. **Holzforschung**, v. 71, n. 2, p. 137-145, 2017. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0058>

PAPANDREA, S. F.; PROTO, A. R.; CATALDO, M. F.; ZIMBALATTI, G. Comparative evaluation of inspection techniques for decay detection in urban trees. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 3, n. 1, p. 14, 2020. <https://doi.org/10.3390/IECF2020-07969>

PARASKAR, P. M.; PRABHUDESAI, M. S.; HATKAR, V. M.; KULKARNI, R. D. Vegetable oil based polyurethane coatings—A sustainable approach: A review. **Progress in Organic Coatings**, v. 156, p. 106267, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106267>

PARK, S.; JEONG, B.; PARK, B-D. A comparison of adhesion behavior of urea-formaldehyde resins with melamine-urea-formaldehyde resins in bonding wood. **Forests**, v. 12, n. 8, p. 1037, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12081037>

PARRA-SERRANO, L. J.; PIVA, M. E. M.; CERCHIARI, A. M. F.; LIMA, I. L. D.; GARCIA, J. N. Use of *Hevea brasiliensis* rubberwood for glulam beam production. **Floresta e Ambiente**, v. 25, 2018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.038616>

RAYDAN, N. D. V.; LEROYER, L.; CHARRIER, B.; ROBLES, E. Recent advances on the development of protein-based adhesives for wood composite materials - A review. **Molecules**, v. 26, n. 24, p. 7617, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26247617>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: junho 2022.

RINDLER, A.; HANSMANN, C.; KONNERTH, J. The effect of moisture on the mechanical response of wood, adhesive and their interphase by means of nanoindentation. **Wood Science and Technology**, v. 53, n. 4, p. 729-746, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00226-019-01100-4>

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Matéria**, v. 22, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0140>

SEGUNDINHO, P. G. A.; SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Revista Ciência da Madeira**, v. 9, n. 2, 2018. [http:// 10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p123-133](http://10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p123-133)

SEGUNDINHO, P. G. A.; OLIVEIRA, R. G. E.; GONÇALVES, F. G.; LOPES, N. F.; ALVES, R. C.; AZEVEDO, M. S. Avaliação da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada. **Revista Matéria**, v. 26, n. 3, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13030>

SETTER, C.; IDANES, U. L.; DE NOVAIS MIRANDA, E. H.; BRITO, F. M. S.; MENDES, L. M.; JUNIOR, J. B. G. Influence of wood species and adhesive type on the performance of multilaminated plywood. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 36, p. 50835-50846, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14283-w>

SILVA, G. C.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, G. D. L.; SILVA, B. C. D.; LOSSANO, W. C. D. S., ABREU, H. D. S. Propriedades de adesivo aplicado em painéis a partir da substituição por lignossulfonato do processo sulfito. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 322-335, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0140>

SHARAPOV, E.; BRISCHKE, C.; MILITZ, H.; SMIRNOVA, E. Prediction of modulus of elasticity in static bending and density of wood at different moisture contents and feed rates by drilling resistance measurements. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, n. 5, p. 833-842, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2>

SHARAPOV, E.; WANG, X.; SMIRNOVA, E. Drill bit friction and its effect on resistance drilling measurements in logs. In: PROCEEDINGS OF THE 20TH INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, Madison. 2017. p. 12-15.

TOUMPANAKI, E.; SHAH, D. U.; EICHHORN, S. J. Beyond what meets the eye: Imaging and imagining wood mechanical–structural properties. **Advanced Materials**, v. 33, n. 28, p. 2001613, 2021. <https://doi.org/10.1002/adma.202001613>

TREU, A.; BREDESEN, R.; BONGERS, F. Enhanced bonding of acetylated wood with an MUF-based adhesive and a resorcinol-formaldehyde-based primer. **Holzforschung**, v. 74, n. 4, p. 382-390, 2020. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0056>

WU, X.; LI, G.; JIAO, Z.; WANG, X. Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection. **Applications in Plant Sciences**, v. 6, n. 10, p. e01187, 2018. <https://doi.org/10.1002/aps3.1187>

ZANGIÁCOMO, A. L.; BALANCO, G. G.; CRHISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Glued laminated timber produced with tropical brazilian wood species. **Journal of Applied Science and Technology**, v. 23, p. 1-12, 2017. <http://doi.org/10.9734/CJAST/2017/34690>

CAPÍTULO III - AVALIAÇÃO DESTRUTIVA E NÃO DESTRUTIVA EM VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE EUCALIPTO

Resumo: Os produtos engenheirados, como a madeira lamelada colada (MLC), são uma opção atraente do ponto de vista sustentável, além de permitir a aplicação de peças de pequenas dimensões capaz de atingir grandes vãos. O objetivo deste capítulo foi caracterizar as propriedades mecânicas por meio de ensaios não destrutivos e destrutivos para avaliar o comportamento experimental de vigas de MLC produzidas de eucalipto de clone *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. O estudo foi realizado em 12 vigas de MLC produzidas com os adesivos melamina-ureia-formaldeído (MUF), resorcinol-formaldeído (RF) e poliuretano (PUR), sendo quatro vigas por adesivo. O módulo de elasticidade das vigas de MLC foi obtido com uso de técnicas não destrutivas, com os ensaios de vibração transversal, vibração longitudinal, *stress wave* com *Fakopp* e com *Metriguard* e flexão estática. A partir de corpos de prova obtidos de elementos de MLC, foram investigadas a resistência à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras para as condições seca e saturada. Os resultados mostraram que houve boa correlação entre os módulos de elasticidade obtidos pelo ensaio de vibração transversal e a flexão estática ($R = 0,82$). Portanto, o método de vibração transversal é uma técnica confiável para avaliação do módulo de elasticidade (MOE). Verificou-se que não houve diferença estatística nos resultados obtidos para a resistência à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras para as condições seca e saturada. Logo, foi possível concluir que a madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* associada aos adesivos MUF, RF e PUR apresenta potencial para aplicação como elemento estrutural em MLC.

Palavras-chave: *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, elemento estrutural, módulo de elasticidade, ensaio dinâmicos.

CHAPTER III - DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF EUCALYPTUS GLULAM BEAMS

Abstract: Engineered products, such as glulam, are an attractive option from a sustainable point of view, in addition to allowing the application of small pieces capable of reaching large spans. The objective of this chapter was to characterize the mechanical properties by means of non-destructive and destructive tests to evaluate the experimental behavior of glulam beams produced from eucalyptus clone *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. The study was carried out on 12 glulam beams produced with melamine-urea-formaldehyde (MUF), resorcinol-formaldehyde (RF) and polyurethane (PUR) adhesives, with four beams per adhesive. The modulus of elasticity of the glulam beams was obtained using non-destructive techniques, with transverse vibration, longitudinal vibration, stress wave tests with Fakopp and Metriguard and static bending. From specimens obtained from glulam elements, the parallel compressive strength to the fibers and the parallel shear strength to the fibers were investigated for dry and saturated conditions. The results showed that there was a good correlation between the modulus of elasticity obtained by the transverse vibration test and the static bending ($R = 0.82$). Therefore, the transverse vibration method is a reliable technique for evaluating the modulus of elasticity (MOE). The use of non-destructive techniques for the mechanical characterization of glulam beams should be encouraged in order to ensure a better use of the material. It was verified that there was no statistical difference in the results obtained for the parallel compressive strength to the fibers and the parallel shear strength to the fibers for the dry and saturated conditions. Therefore, it was possible to conclude that the wood of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* associated with MUF, RF and PUR adhesives has potential for application as a structural element in glulam.

Keywords: *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, structural element, modulus of elasticity, dynamic tests.

1 INTRODUÇÃO

A madeira lamelada colada (MLC) é reconhecida como um material compósito de alto desempenho utilizado na construção civil. A fabricação de elementos estruturais em MLC permite diminuir a variabilidade do produto, além de garantir que este seja menos afetado por características naturais de crescimento, como nós (ANSHARI et al, 2012). As lamelas de madeira são coladas com agentes ligantes que garantem uma alta resistência sob cargas estáticas e dinâmicas (MIRSKI et al, 2020).

Uma característica importante da MLC é a possibilidade de balanceamento das lamelas de forma que as peças com maior módulo de elasticidade sejam posicionadas nas extremidades e às que possuem módulo menor sejam localizadas próximas a linha neutra. Tal medida proporciona melhor aproveitamento das peças e permite melhorar o desempenho estrutural do elemento de MLC (GAO et al, 2019).

Construções em MLC apresentam boa estabilidade dimensional, o que permite atingir grandes vãos (YANG et al, 2020). Esteticamente, os elementos estruturais podem atender às necessidades arquitetônicas e de resistência. Além disso, a MLC que possui grande seção transversal tem propriedades de retardantes de incêndios (CHEN et al, 2017). Portanto, em comparação com a madeira serrada de mesma seção transversal, o produto engenheirado possui propriedades mecânicas superiores (BOURREAU, 2013).

As propriedades da MLC são diretamente influenciadas pela espécie de madeira, pelos defeitos contidos no material, pela espessura e número das lamelas, pelo tipo de cola utilizado e pela carga adotada durante a prensagem (NADIR; NAGARAJAN, 2014; SOTAYO et al, 2020). Como é o caso de todos os materiais de construção, é necessário avaliar o desempenho estrutural dos membros produzidos com as lamelas, para sua aplicação.

Na maioria dos casos, a escolha das espécies e do adesivo influenciará significativamente tanto o processo de fabricação da MLC, quanto suas propriedades tecnológicas (LARA-BOCANEGRA et al, 2020). De forma geral, fatores de projeto desenvolvidos para uso em madeira maciça também são aplicados à madeira composta estrutural, embora os dois tipos de produtos tenham propriedades distintas (KOMARIAH et al, 2015). As principais dificuldades associadas ao estabelecimento da resistência à flexão de um material de tamanho real, de acordo com as configurações de teste de flexão padrão, são que os membros podem falhar em vários

modos, como cisalhamento ou compressão paralela às fibras, dependendo da madeira e da colagem entre as lamelas (MOHAMAD; RAZLAN; AHMAD, 2011).

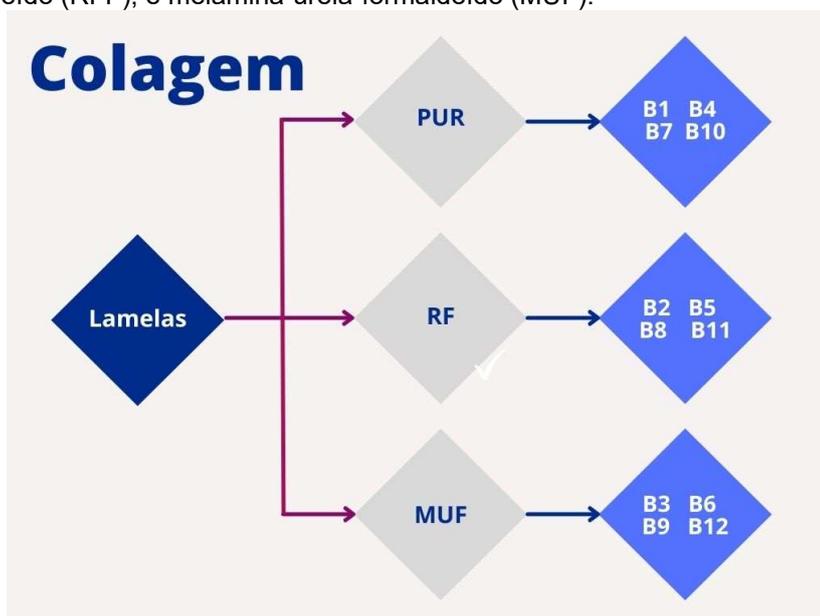
Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar as propriedades mecânicas por meio de ensaios não destrutivos e destrutivos para avaliar o comportamento experimental de vigas de MLC produzidas com madeira do híbrido de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção das vigas de madeira lamelada colada (MLC) foram utilizadas 72 peças de madeira serrada de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, provenientes da extração de florestas adultas de árvores plantadas na Região Sudeste do Brasil. As peças serradas não possuíam nenhum tipo de tratamento preservativo e apresentavam dimensões nominais de 2,5 × 9,3 × 310,7 cm (espessura × largura × comprimento), com teor de umidade médio igual a 10,68%.

Os adesivos utilizados para a colagem das lamelas face a face foram o resorcinol-formaldeído (RF), o poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona (PUR) e a melamina-ureia-formaldeído (MUF). Para o estudo foram produzidas 12 vigas estruturais formadas por 6 lamelas com 25 mm de espessura. Após aparelhamento, as lamelas apresentaram as seguintes dimensões: 2,5 × 8,5 × 302 cm (espessura × largura × comprimento). Foram produzidas quatro vigas para cada tipo de adesivo, denominadas conforme o esquema apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema de colagem das vigas utilizando os adesivos poliuretano (PUR), resorcinol-formaldeído (RFF), e melamina-ureia-formaldeído (MUF).



Fonte: o autor.

O processo prévio de classificação visual e mecânica das lamelas está apresentado no Capítulo 2, bem como o balanceamento utilizado para definir a localização das tábuas de acordo com o módulo de elasticidade (MOE). Dessa forma, foi realizada a distribuição racional das peças, garantindo que as vigas apresentassem propriedades de rigidez superiores às de vigas montadas com distribuição aleatória de lamelas (SOUZA et al., 2022; CUNHA; MATOS, 2010).

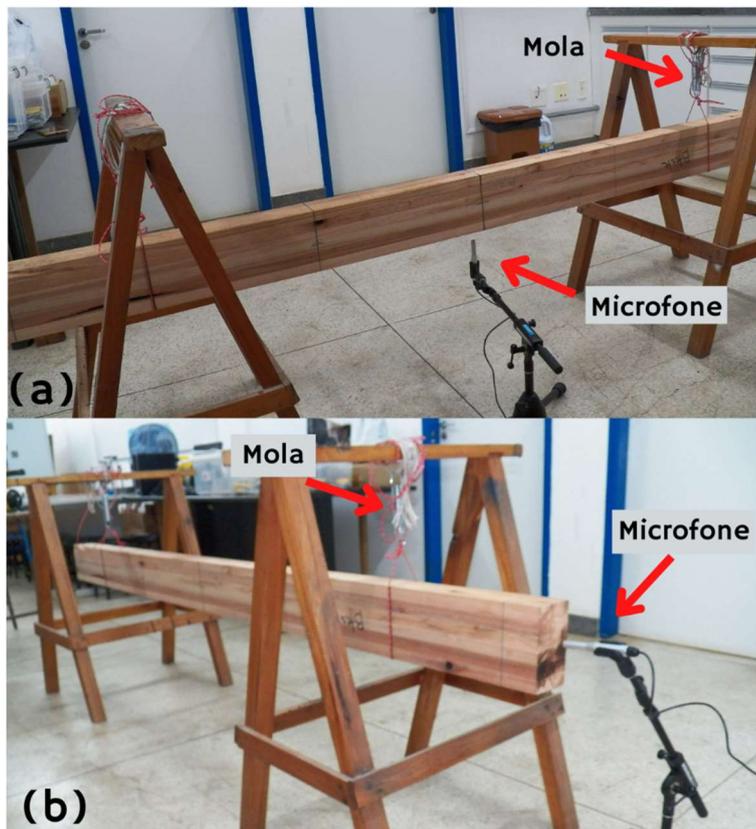
2.1 Caracterização mecânica por meio de ensaios não destrutivos

Após a cura das vigas de MLC, o material foi destinado à marcenaria do Departamento de Ciências Florestais e Madeira da UFES (DCFM/UFES), para que as faces laterais fossem aplainadas com o objetivo de remover o excesso de adesivo por conta da pressão aplicada durante a colagem. Posteriormente, foram realizados os ensaios não destrutivos de caracterização mecânica para a obtenção dos módulos de elasticidade das vigas pelos métodos de vibração transversal, vibração longitudinal, *stress wave* com *Fakopp*, *stress wave* com *Metriguard* e flexão estática.

Os ensaios de vibração transversal e longitudinal foram realizados de acordo com a ASTM E1876 (2022), por meio do *software* Sonelastic, que capta as frequências e fornece o valor do módulo de elasticidade (MOE). Para a execução dos ensaios, a condição de contorno livre-livre foi adotada (SEGUNDINHO et al., 2013a). Esta

condição foi atingida com a suspensão das vigas por meio de linhas de nylon e molas de pequena rigidez, conforme mostrado nas Figura 2(a) e (b).

Figura 2 – Ensaios de vibração transversal (a) e longitudinal (b) das vigas de MLC.



Fonte: o autor.

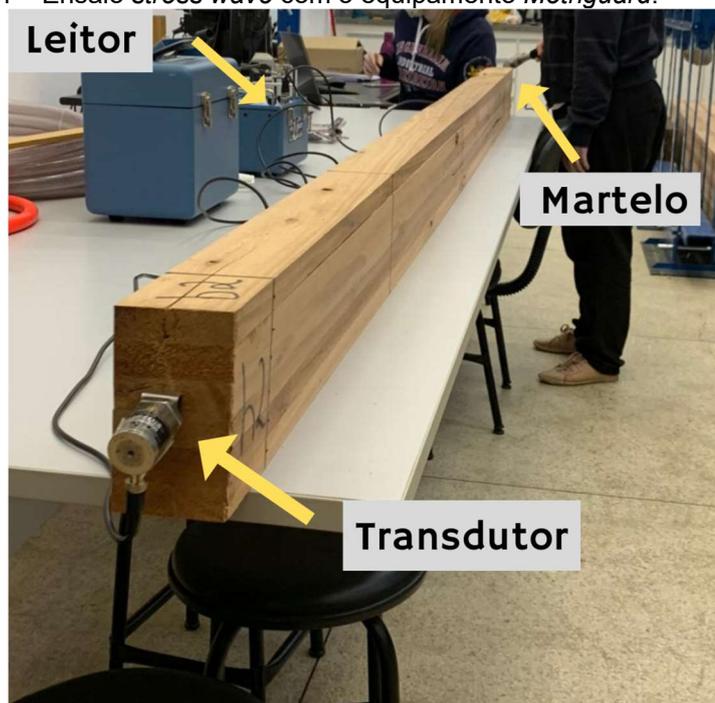
O método *stress wave* foi executado com o equipamento *Fakopp* da empresa FAKOPP Ent. e seguiu a metodologia de Görgün e Dündar (2018). Para realização do ensaio, os sensores são colocados nas extremidades da viga, de forma que a onda se propague, longitudinalmente, ao sentido das fibras, quando é aplicado impacto com um martelo em um dos sensores (Figura 3). O método *stress wave* também foi realizado com o equipamento *Metriguard*, modelo A239. O equipamento mede o tempo de propagação da onda de tensão por meio de dois transdutores, no qual um martelo foi o emissor e o transdutor plano foi o receptor (Figura 4).

Figura 3 - Ensaio *stress wave* com o equipamento *Fakopp*.



Fonte: o autor.

Figura 4 – Ensaio *stress wave* com o equipamento *Metriguard*.



Fonte: o autor.

O ensaio de flexão estática foi embasado na ASTM D 198 (2022), em que o módulo de elasticidade das vigas foi obtido por resistência à flexão em quatro pontos. O ensaio foi realizado com um anel dinamométrico integrado à prensa hidráulica da marca Enerparc, com capacidade de carga de 25 toneladas força, e a um relógio comparador para medir o deslocamento (flecha). A carga foi aplicada manualmente. As peças apresentaram dimensões estruturais, conforme a relação $L \leq 21h$, em que L é o comprimento do vão e h a altura da peça. Essa relação diminui as tensões de cisalhamento da peça, o que permite desprezar a força cortante (MIRSKI et al., 2020; CHRISTOFORO et al., 2013).

O carregamento foi aplicado em dois pontos equidistantes das reações. Os pontos de carga foram instalados a uma distância de sua reação igual a um terço do

vão ($l/3$) (carregamento do terceiro ponto). Para a definição do carregamento, o limite adotado foi a flecha máxima igual a $L/200$, em que L é o comprimento entre apoios. Tal flecha foi adotada a fim de garantir a linearidade física e geométrica das vigas.

Figura 5 – Ensaio de flexão estática com limite até a flecha máxima.



Fonte: o autor.

2.2 Caracterização mecânica por meio de ensaios destrutivos

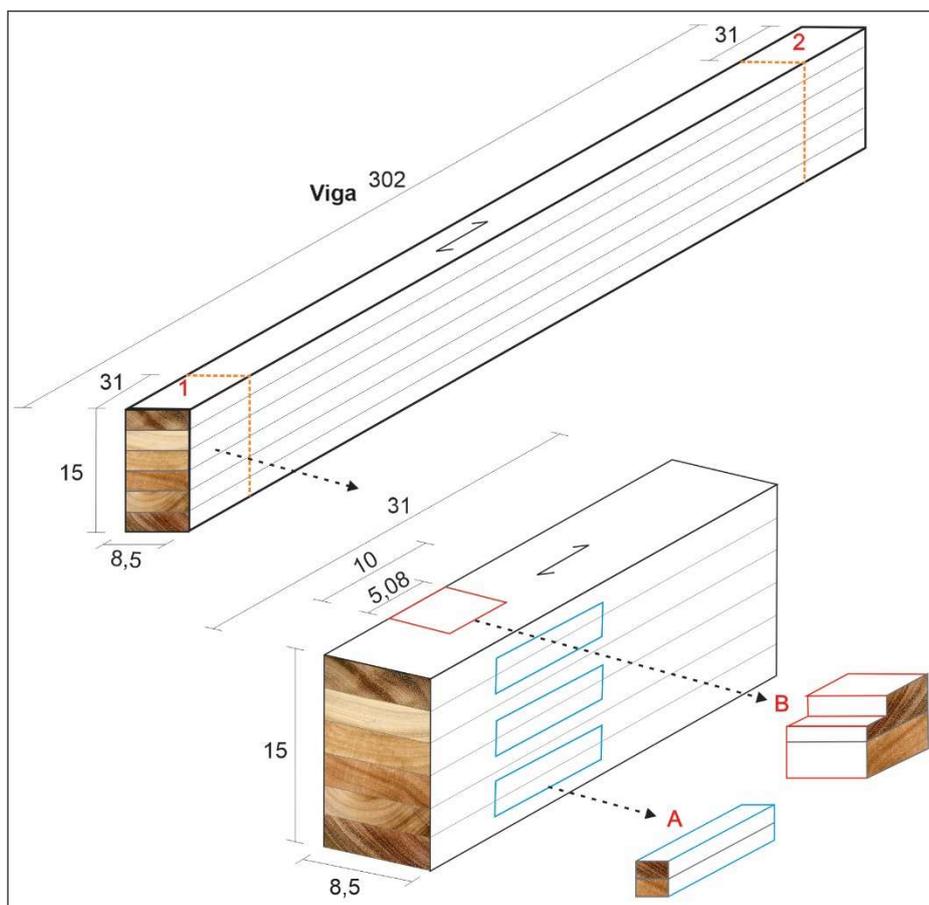
Os ensaios destrutivos de compressão paralela às fibras e de cisalhamento paralelo às fibras foram feitos de acordo com a norma ASTM D143 (ASTM, 2022), para as condições secas e saturadas (Figura 6). Os corpos de prova (CP's) referentes aos ensaios citados foram retirados das vigas conforme Figura 7.

Figura 6– (A) Ensaio de compressão paralela às fibras e (B) Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: o autor.

Figura 7 – Esquema de retirada dos corpos de prova das vigas de MLC: (A) resistência à compressão paralela às fibras e (B) resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Obs: unidades de medidas em cm.



Fonte: o autor.

As dimensões dos corpos de prova de compressão paralela às fibras foram de $2,5 \times 2,5 \times 10$ cm (largura \times espessura \times altura). No total, foram obtidos 72 CP's para o ensaio de compressão paralela às fibras e 48 para o ensaio de cisalhamento à compressão paralela às fibras, os quais foram agrupados de acordo com o tipo de adesivo empregado na colagem das vigas e divididos igualmente entre a condição seca e a saturada.

2.3 Análise estatística

As análises estatísticas para estimativa do módulo de elasticidade (MOE) foram consideradas em delineamento inteiramente casualizado (DIC). O teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para verificar a normalidade dos dados. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, F , $p < 0,05$) com aplicação de teste de médias (Tukey, $p < 0,05$). A ANOVA de uma via com medidas repetidas foi empregada para verificar o efeito dos ensaios não destrutivos sobre o resultado dos módulos de elasticidade. A comparação entre pares foi com a correção de Bonferroni.

O grau de correlação entre os ensaios não destrutivos de propriedade mecânica foi obtido pelo coeficiente de Pearson. Quando possível, modelos de regressão linear foram gerados a partir das correlações significativas e analisados pela análise de variância (F , $p < 0,05$). Neste caso, a qualidade dos ajustes foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2).

As análises estatísticas para os ensaios destrutivos de compressão paralela às fibras e de cisalhamento paralelo às fibras também foram aplicadas em delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando três tratamentos de acordo com a aplicação do adesivo para colagem das vigas de MLC (PUR, RF e MUF). O teste de Henze-Zirkler foi utilizado para verificar a normalidade multivariada dos dados. Os seguintes pressupostos para a aplicação de análise de variância multivariada, foram testados, incluindo a ausência de *outliers* multivariados, homogeneidade das matrizes de covariância e variância e ausência de multicolinearidade ($R < 0,90$).

A ausência de *outliers* foi verificada pelo cálculo da distância de Mahalanobis ($p < 0,001$). Para verificação da homogeneidade das matrizes de covariância e variância, utilizou-se o teste de Levene. Para verificar a ausência de multicolinearidade, adotou-se a correlação de Pearson, em que a correlação entre as variáveis deve ser inferior a 0,90.

A análise de variância foi empregada para verificar o efeito dos tipos de adesivos empregados sobre a resistência à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras, com aplicação do teste de lambda de Wilks ($p < 0,05$). A comparação entre médias feita pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Todos os dados foram processados e analisados no *Software R* (R Core, 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização mecânica por meio de ensaios não destrutivos

Na Tabela 1 constam os módulos de elasticidade dinâmicos e estático para as vigas de MLC obtidos pelos ensaios não destrutivos (vibração longitudinal, vibração transversal, *stress wave - Fakopp* e *Metriguard* - e flexão estática) e a estatística descritiva dos dados obtidos.

Tabela 1 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos e estático para as vigas de MLC.

| VIGA | MOE _{VL} (GPa) | MOE _{VT} (GPa) | MOE _{SWF} (GPa) | MOE _{SWM} (GPa) | MOE _{FE} (GPa) |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| B1 | 17,56 | 17,98 | 18,21 | 18,42 | 17,42 |
| B2 | 18,12 | 18,54 | 19,08 | 18,82 | 17,38 |
| B3 | 18,21 | 18,60 | 18,68 | 20,16 | 17,38 |
| B4 | 18,10 | 18,06 | 19,19 | 18,48 | 18,12 |
| B5 | 17,84 | 18,23 | 17,80 | 21,37 | 17,36 |
| B6 | 18,12 | 18,54 | 18,82 | 17,12 | 17,69 |
| B7 | 17,81 | 18,01 | 17,87 | 20,04 | 16,74 |
| B8 | 18,04 | 18,89 | 18,43 | 19,99 | 17,82 |
| B9 | 17,66 | 18,75 | 18,84 | 18,91 | 17,85 |
| B10 | 17,64 | 19,24 | 18,66 | 20,89 | 18,06 |
| B11 | 17,49 | 18,83 | 17,94 | 17,24 | 17,41 |
| B12 | 17,84 | 18,79 | 18,65 | 17,43 | 17,71 |
| Média | 17,87ab | 18,54b | 18,52b | 19,07b | 17,49a |
| Desvio padrão | 0,25 | 0,39 | 0,47 | 1,42 | 0,37 |
| Mediana | 17,84 | 18,57 | 18,66 | 18,87 | 17,41 |
| Coefficiente de variação | 1,38% | 2,10% | 2,52% | 7,46% | 2,10% |

MOE_{VL} = módulo de elasticidade obtido por vibração longitudinal, MOE_{VT} = módulo de elasticidade obtido por vibração transversal, MOE_{SWF} = módulo de elasticidade obtido por *stress wave* com o equipamento Fakopp, MOE_{SWM} = módulo de elasticidade obtido por *stress wave* com o equipamento Metriguard, MOE_{FE} = módulo de elasticidade obtido por flexão estática. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente (Tukey, $p > 0,05$).

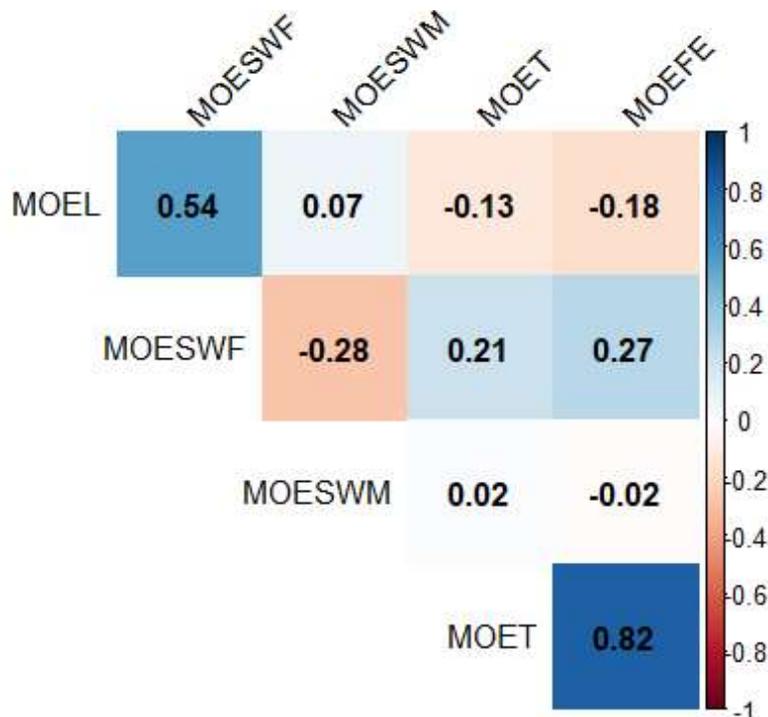
Os resultados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). Após o atendimento dos pressupostos (normalidade,

homoscedasticidade, independência e esfericidade), a análise de variância foi aplicada por meio da ANOVA, que permitiu concluir que há efeito dos ensaios utilizados sobre o resultado dos módulos de elasticidade.

Pela comparação entre pares, observou-se que o ensaio de vibração longitudinal e o ensaio de flexão estática não apresentaram diferença significativa ($p > 0,05$). O MOE médio obtido por meio do ensaio de flexão estática apresentou valor menor que dos ensaios dinâmicos de vibração transversal e *stress wave*, tal comportamento confirma resultados encontrados na literatura (SOUZA et al., 2022; SEGUNDINHO et al., 2013b; MOCHAN; MOORE; CONNOLLY, 2009).

A Figura 8 consta a correlação de Pearson entre os módulos de elasticidade obtidos por ensaios dinâmicos e estáticos. Nesta análise, o ensaio de vibração transversal apresentou correlação forte em relação ao ensaio de flexão estática ($R = 0,82$). Os demais ensaios apresentaram correlação desprezível em relação ao ensaio de flexão estática. Isso pode ter ocorrido pela influência da velocidade no sentido longitudinal apresentar sensibilidade à anatomia da madeira, o que afeta a amplitude de vibração e o tempo de persistência da vibração, depois que a excitação cessa (CARRASCO et al., 2018).

Figura 8 – Matriz gráfica de correlação de Pearson entre os módulos de elasticidade obtidos por ensaios dinâmicos e estático



MOEL – ensaio de vibração longitudinal, MOET – ensaio de vibração transversal, MOESWF – ensaio de *stress wave* com equipamento *Fakopp*, MOESWM – ensaio de *stress wave* com equipamento *Metriguard*) e MOEFE – ensaio de flexão estática.

O ensaio de vibração transversal tem como vantagem sua aplicação quando não há possibilidade de acessar as extremidades da viga, possibilitando resultados confiáveis para estimação do módulo de elasticidade de elementos estruturais (OPAZO-VEGA; ROSALES-GARCÉS; OYARZO-VERA, 2021). Pela análise estatística realizada, verificou-se que o ensaio dinâmico de vibração transversal foi o que representou satisfatoriamente o ensaio estático. A direção da excitação e a velocidade de propagação da onda ao longo da peça colaboraram para os resultados obtidos (CARREIRA; DIAS; SEGUNDINHO, 2017; CUNHA; MATOS, 2011).

Pela análise de variância entre o módulo dinâmico para cada ensaio e o módulo estático, verificou-se que somente o MOE_{VT} apresentou correlação linear significativa ($p < 0,05$) em relação ao MOE_{FE}. As demais análises mostraram que não existiu regressão, não sendo possível ajustar equações para representar a relação entre as variáveis (Tabela 2). É possível notar que os ensaios dinâmicos que utilizam a direção longitudinal receberam influência da velocidade de propagação da onda ao longo da peça ensaiada e da densidade do material (LLANA; SHORT; HARTE, 2020). Tendo

em vista a aplicação do balanceamento nas vigas, a densidade das tábuas pode ter influenciado a leitura longitudinal por meio dos ensaios dinâmicos.

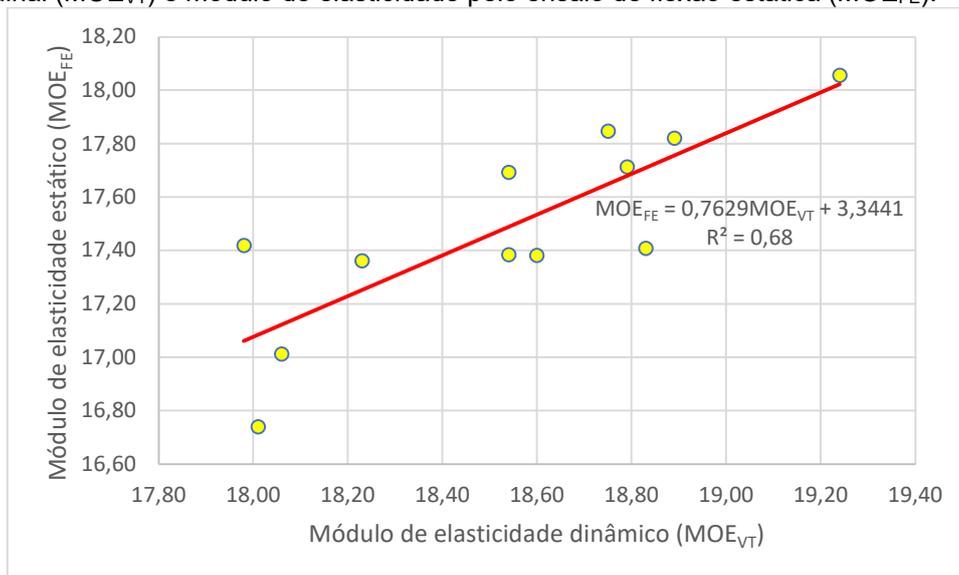
Tabela 2 – ANOVA para verificar a aplicação da regressão linear.

| Variáveis | ANOVA p - valor | Regressão |
|--|--------------------|-----------|
| MOE _{VL} x MOE _{FE} | 0,58 (p > 0,05) | Não |
| MOE _{VT} x MOE _{FE} | 0,001 (p < 0,05) | Sim |
| MOE _{SWF} x MOE _{FE} | 0,40 (p > 0,05) | Não |
| MOE _{SWM} x MOE _{FE} | 0,95 (p > 0,05) | Não |

MOE_{VL} = módulo de elasticidade obtido por vibração longitudinal, MOE_{VT} = módulo de elasticidade obtido por vibração transversal, MOE_{SWF} = módulo de elasticidade obtido por *stress wave* com o equipamento *Fakopp*, MOE_{SWM} = módulo de elasticidade obtido por *stress wave* com o equipamento *Metriguard*, MOE_{FE} = módulo de elasticidade obtido por flexão estática.

Ao considerar que as variáveis MOE_{VT} e MOE_{FE} atenderam aos pressupostos de linearidade, um modelo de regressão foi aplicado para explicar a relação entre ambos (Figura 9). O modelo estatístico apresentou correlação significativa, com coeficientes de determinação ($R^2 = 0,68$), o que indica que o módulo estático é parcialmente explicado pelo dinâmico obtido pelo ensaio de vibração transversal. A análise de resíduos da regressão foi verificada e constatou-se uniformidade da distribuição dos resíduos em torno do zero, indicando a boa adequação do modelo desenvolvido.

Figura 9 - Modelo de regressão linear entre o módulo de elasticidade pelo ensaio de vibração longitudinal (MOE_{VT}) e módulo de elasticidade pelo ensaio de flexão estática (MOE_{FE}).



Fonte: o autor.

Um estudo sobre a rigidez de vigas de MLC produzidas com *Pinus taeda* e o adesivo poliuretano utilizou o ensaio dinâmico de *stress wave*, com o equipamento *Metriguard*, em comparação com o estático (CUNHA; MATOS, 2011). A análise estatística mostrou uma correlação muito baixa entre o método dinâmico e estático, não sendo possível a elaboração de equação adequada de correlação entre as variáveis, coincidindo com o ocorrido neste estudo para os ensaios dinâmicos de vibração longitudinal e *stress wave*. Os autores concluíram que o MOE obtido pelo ensaio dinâmico explica parcialmente o estático e que para uma análise mais precisa, seria necessário considerar também outras variáveis como matéria-prima, condições de fabricação das vigas e procedimentos utilizados nos ensaios.

Vigas de MLC de madeira de paricá, foram ensaiadas por métodos dinâmico e estático (ROSA et al, 2019). Os resultados obtidos para o MOE dinâmico e estático foram utilizados para desenvolver a equação de correlação ($p < 0,05$). A equação apresentou erro relativo médio de 13,5% e coeficiente de determinação $R^2 = 0,056$. Dessa forma, os autores optaram por fazer uma equação ajustada, na qual foi possível obter $R^2 = 0,98$.

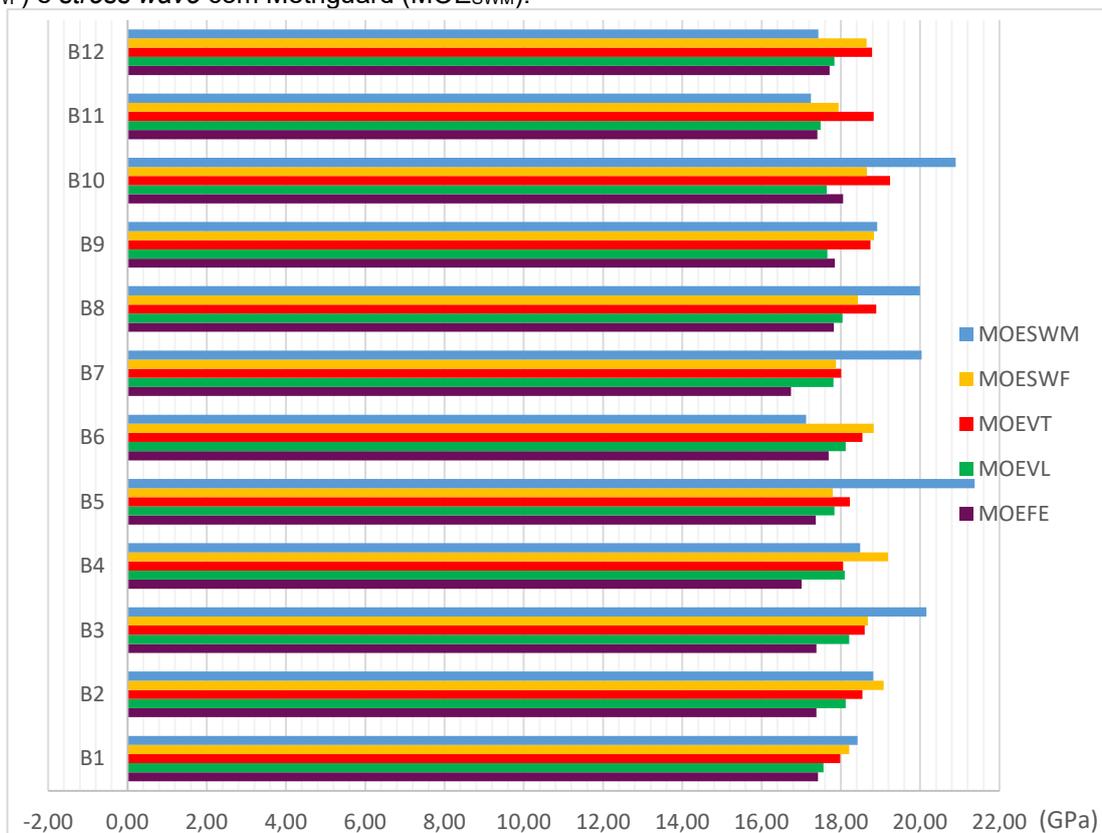
Os MOE's de vigas de MLC, fabricadas com a madeira de acácia (*Acacia melanoxylon* R. Br.) colada com o adesivo poliuretano, foram obtidos por meio de ensaio de vibração longitudinal e comparados ao módulo estático obtido pelo ensaio de flexão em três pontos (MARTINS et al., 2020). O estudo utilizou vigas de MLC

homogêneas, em que as lamelas apresentavam módulos de elasticidade constantes e vigas mistas, nas quais as lamelas próximas às linhas neutras possuíam menor resistência. A análise estatística conclui que o coeficiente de correlação entre o MOE dinâmico e o estático para as vigas homogêneas e mistas foi, respectivamente, de 0,99 e 1,00.

A resistência de vigas de MLC de *Eucalyptus globulus* coladas com PUR contendo emendas dentadas, tipo *finger-joints*, foi avaliada por Lara-Bocanegra et al. (2017). A correlação entre a resistência à flexão estática e o módulo de elasticidade dinâmica do material foi avaliada. Em alguns casos, baixas correlações foram encontradas ($R^2 = 0,004$ a $0,44$) em outros, não houve correlação entre as variáveis. O estudo sugere o aumento do número de elementos amostrais para aprimorar a análise estatística.

De forma geral, a variação entre os módulos de elasticidade obtidos por ensaios dinâmicos comparados ao ensaio estático de flexão estática (Figura 10) corrobora com o observado na literatura, em torno de 10% (SEGUNDINHO et al, 2013a; YU; WANG, XIA, 2015). Neste estudo, somente os módulos de elasticidade obtidos pelo ensaio de *stress wave* com o *Metriguard*, apresentaram variação de até 18%. Portanto, a aplicação de ensaios dinâmicos para a verificação da resistência de peças estruturais de MLC pode ser aplicada.

Figura 10 – Variação dos módulos de elasticidade das vigas de MLC para os ensaios de flexão estática (MOE_{FE}), vibração longitudinal (MOE_{VL}), vibração transversal (MOE_{VT}), *stress wave* com Fakopp (MOE_{SWF}) e *stress wave* com Metriguard (MOE_{SWM}).



Fonte: o autor.

3.2 Caracterização mecânica por meio de ensaios destrutivos

Os resultados obtidos para resistência mecânica aos esforços de compressão e cisalhamento paralelo às fibras, considerando os três tipos de adesivos empregados, são apresentados, respectivamente, na Tabela 3 e Tabela 4, para as condições seca e saturada. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro Wilk ($p > 0,05$). A homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Levene ($p > 0,05$). Diante do atendimento de todos os pressupostos, a análise de variância foi aplicada.

Tabela 3 – Resistência à compressão paralela (f_{c0}) às fibras nas condições seca e saturada e umidade da madeira

| Condição seca | | |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Adesivo | f_{c0} (MPa) | Umidade (%) |
| PUR | 52,06 a *(8,86) | 10,74 |
| RF | 50,49 a (8,73) | 10,93 |
| MUF | 55,55 a (6,87) | 10,76 |
| Condição saturada | | |
| Adesivo ** | f_{c0} (MPa) | Umidade (%) |
| PUR | 25,87 a (3,02) | 98,62 |
| RF | 27,70 a (7,14) | 92,73 |
| MUF | 27,51 a (5,50) | 97,34 |

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $p > 0,05$); ** PUR: Poliuretano; RF: Resorcinol-formaldeído; MUF: Melamina-ureia-formaldeído; f_{c0} : resistência à compressão paralela às fibras; Valor entre parênteses refere-se ao desvio padrão.

Tabela 4 – Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) nas condições seca e saturada e umidade da madeira

| Condição seca | | |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Adesivo | f_{v0} (MPa) | Umidade (%) |
| PUR | 11,28 a *(1,96) | 10,65 |
| RF | 12,69 a (3,02) | 10,72 |
| MUF | 12,82 a (2,76) | 11,27 |
| Condição saturada | | |
| Adesivo ** | f_{v0} (MPa) | Umidade (%) |
| PUR | 8,13 a (2,24) | 79,42 |
| RF | 6,61 a (1,88) | 69,03 |
| MUF | 7,98 a (1,48) | 63,72 |

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $p > 0,05$); ** PUR: Poliuretano; RF: Resorcinol-formaldeído; MUF: Melamina-ureia-formaldeído; f_{c0} : resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; Valor entre parênteses refere-se ao desvio padrão.

Os resultados obtidos pela ANOVA mostraram que não há efeito do adesivo sobre esforços mecânicos estudados, tanto na condição seca quanto na saturada. Os valores obtidos indicam que a colagem foi eficiente para todos os adesivos utilizados no estudo. Os valores de resistência à compressão paralela às fibras obtidos por Segundinho et al. (2018) para MLC colada com PUR, com a madeira de *Eucalyptus* sp., foram condizentes aos deste estudo, para a condição seca e saturada.

A propriedade de resistência à compressão paralela às fibras é importante para o funcionamento do elemento estrutural colado. Quando uma viga em MLC está em serviço, as fibras inferiores são tracionadas e as superiores comprimidas, o que implica na necessidade de resistência para suportar a carga aplicada (FARIA et al., 2019).

Comportamento semelhante a este estudo para cisalhamento paralelo às fibras foi observado por Segundinho et al. (2021) para a mesma espécie. Os autores encontraram resistência igual a 11,43 MPa, para MLC colada com o adesivo RF e 10,45 MPa, para o PUR, na condição seca. Para condição saturada, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foi de 7,54 MPa e 5,91 MPa, respectivamente, para MLC colada com RF e PUR.

O híbrido *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, com idade ente 6 e 8 anos, foi utilizada para a fabricação de MLC, com o uso do adesivo RF (CHEN et al., 2020). A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras obtida foi de 11,83 MPa. Os resultados condizem com os obtidos no presente estudo.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é uma propriedade relevante na aplicação da madeira para a fabricação de vigas de MLC, tendo em vista que o cisalhamento consiste na ruptura das fibras por uma tensão aplicada paralelamente a elas. O estado limite último da lamela, quanto ao cisalhamento paralelo às fibras, deve ser garantido pela capacidade de resistência interna ao deslizamento de uma lamela sobre a outra, ou seja, do desempenho de colagem, juntamente com a resistência ao cisalhamento da madeira (FARIA et al., 2020; RIBEIRO; MASCIA, 2019).

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados foi possível concluir que o método de vibração transversal é uma técnica confiável para avaliação do módulo de elasticidade (MOE) de vigas de MLC. Mesmo com os ensaios dinâmicos, vibração longitudinal e stress wave, com o Fakopp, não terem apresentado correlações com o método de flexão estática, seu emprego não deve ser descartado; pois a variação média dos resultados de MOE foi inferior a 10%, permitindo que seus resultados sejam aplicados para estimativa do módulo de elasticidade. Portanto, o emprego de técnicas não destrutivas para a caracterização mecânica de vigas de MLC deve ser incentivado de forma a assegurar um melhor aproveitamento do material.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica das vigas de MLC, nas condições seca e saturada, comprovam que a madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* associada aos adesivos PUR, RF e MUF possui grande potencial para a fabricação de MLC.

5 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198 - 22**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Philadelphia, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-143**: Standard test methods for small clear specimens of timber, Philadelphia, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM E1876 – 22**: Standard Test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Philadelphia, 2022.

ANSHARI, B.; GUAN, Z. W.; KITAMORI, A.; JUNG, K.; KOMATSU, K. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 24-32, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.002>

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, n. 5, p. 653-662, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0721-4>

CARRASCO, E. V. M.; VARGAS, C. B.; SOUZA, M. D. F.; MANTILLA, J. N. R. Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Revista Matéria**, v. 22, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0272>

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; SEGUNDINHO, P. G. A. Nondestructive evaluation of *Corymbia citriodora* logs by means of the free transverse vibration test. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 36, n. 2, p. 1-7, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0401-0>

CHEN, J.; XIONG, H.; WANG, Z.; YANG, L. Experimental buckling performance of eucalyptus-based oriented oblique laminated strand lumber columns under centric and eccentric compression. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120072, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120072>

CHEN, C. K., YANG, J.; CHEN, J.; ZENG, J. W.; WANG, W. Y.; ZHAO, X. L. Fire resistance performance of glulam beam. **Journal of Central South University**, v. 24, n. 4, p. 929-936, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3495-8>

CHRISTOFORO, A. L.; MOLINA, J. C.; PANZERA, T. H.; ALMEIDA, D. H. D.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; SCALIANTE, R. D. M.; LAHR, F. A. R. Módulo de

elasticidade em vigas de madeira de dimensões estruturais pelo método dos mínimos quadrados. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 981-988, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500020>

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo ("stress wave timer"). **Revista Árvore**, v. 34, p. 345-354, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000200018>

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. **Cerne**, v. 17, p. 593-600, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400019>

FARIA, D. L.; CRUZ, T. M.; MESQUITA, L.; DUARTE, P. J.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES, J. B. Number of laminae on the mechanical behavior of glued laminated timber (glulam) of *Toona ciliata* produced with vegetable polyurethane adhesive. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2019. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943014819>

FARIA, D. L.; LOPES, T. A.; SCATOLINO, M. V.; SORIANO, J.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Static bending of glulam beams manufactured with rubber wood and epoxy adhesive. **Revista Matéria**, v. 25, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1104>

GAO, S.; XU, M.; GUO, N.; ZHANG, Y. Mechanical properties of glued-laminated timber with different assembly patterns. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9495705>

GÖRGÜN, H. V.; DÜNDAR, T. Strength grading of turkish black pine structural timber by visual evaluation and nondestructive testing. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 1, p. 57-66, 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005001501>

KOMARIAH, R. N.; HADI, Y. S.; MASSIJAYA, M. Y.; SURYANA, J. Physical-mechanical properties of glued laminated timber made from tropical small-diameter logs grown in Indonesia. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 43, n. 2, p. 156-167, 2015. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2015.43.2.156>

LARA-BOCANEGRA, A. J.; MAJANO-MAJANO, A.; CRESPO, J.; GUAITA, M. Finger-joint performance in engineered laminated products made of *Eucalyptus globulus*. In: **Proceedings of the World Conference on Timber Engineering**. 2016.

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, p. 120355, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120355>

LLANA, D. F.; SHORT, I.; HARTE, A. M. Use of non-destructive test methods on Irish hardwood standing trees and small-diameter round timber for prediction of

mechanical properties. **Annals of forest science**, v. 77, n. 3, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00957-x>

MARTINS, C.; MONTEIRO, S.; KNAPIC, S.; DIAS, A. Assessment of bending properties of sawn and glulam blackwood in Portugal. **Forests**, v. 11, n. 4, p. 418, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11040418>

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; CHUDA-KOWALSKA, M.; KAWALERCZYK, J.; KULIŃSKI, M.; ŁABĘDA, K. The usefulness of pine timber (*Pinus sylvestris* L.) for the production of structural elements. Part II: Strength properties of glued laminated timber. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 4029, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13184029>

MOCHAN, S.; MOORE, J., CONNOLLY, T. **Using acoustic tools in forestry and the wood supply chain**. Edinburgh: Forestry Commission, 2009.

MOHAMAD, W. H. W.; RAZLAN, M. A.; AHMAD, Z. Bending strength properties of glued laminated timber from selected Malaysian hardwood timber. **International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS**, v. 11, n. 4, p. 7-12, 2011.

NADIR, Y.; NAGARAJAN, P. The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 398-405, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.032>

OPAZO-VEGA, A.; ROSALES-GARCÉS, V.; OYARZO-VERA, C. Non-destructive assessment of the dynamic elasticity modulus of eucalyptus nitens timber boards. **Materials**, v. 14, n. 2, p. 269, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14020269>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: outubro 2022.

RIBEIRO, A. B.; MASCIA, N. T. Numerical and experimental study of shear stress behavior of NBR and ASTM standard test specimens for FRP-wood bonds. **Composite Structures**, v. 224, p. 111066, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111066>

ROSA, T. O.; TEREZO, R. F., RIOS, P. D. A., SAMPIETRO, J. A., ROSA, G. O. *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* Glulam classified by non-destructive tests. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.120217>

SEGUNDINHO, P. G. A.; CARREIRA, M. R.; CALIL NETO, C.; REGAZZI, A. J.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 7-14, 2013a. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200002>

SEGUNDINHO, P. G. A.; ZANGIÁCOMO, A. L.; CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; LAHR, F. A. R. Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma*

uncinatum Warm.). **Cerne**, v. 19, p. 441-449, 2013b. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000300011>

SEGUNDINHO, P. G. A.; SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Revista Ciência da Madeira**, v. 9, n. 2, 2018.

SEGUNDINHO, P. G. A.; OLIVEIRA, R. G. E. D.; GONÇALVES, F. G.; LOPES, N. F.; ALVES, R. C.; AZEVEDO, M. S. D. Avaliação da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada. **Revista Matéria**, v. 26, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13030>

SOTAYO, A.; BRADLEY, D.; BATHER, M.; SAREH, P.; OUDJENE, M.; EL-HOUJEYRI, I.; GUAN, Z. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. **Developments in the Built Environment**, v. 1, p. 100004, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>

SOUZA, C. G. F.; MASTELA, L. C.; OLIVEIRA, R. F.; BREDAS, A. M. M.; TAQUETTI, V. B.; SEGUNDINHO, P. G. A. Avaliação dos módulos de elasticidade por meio de ensaios não destrutivos para madeira laminada colada. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 6, p. 47288-47298, 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n6-298>.

YANG, R.; HONG, C.; ZHANG, X.; YUAN, Q.; SUN, Y. Experimental research on structural behaviors of glulam I-beam with a special-shaped section. **Journal of Renewable Materials**, v. 8, n. 2, p. 113, 2020. <https://doi.org/10.32604/jrm.2020.08190>

YU, L.; WANG, J.; XIA, D. Vibration method for elastic modulus of glued laminated beams. In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIAL, MECHANICAL AND MANUFACTURING ENGINEERING (IC3ME 2015). Atlantis Press, 2015. p. 1603-1606. <https://dx.doi.org/10.2991/ic3me-15.2015.309>

CAPÍTULO IV – ESTUDO ANALÍTICO, EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA

Resumo: O objetivo deste estudo é realizar a avaliação analítica, experimental e numérica do comportamento estrutural de vigas de MLC quando submetidas a carregamentos estáticos. Para a avaliação experimental foram produzidas 12 vigas de MLC de madeira de eucalipto e coladas com três adesivos diferentes, sendo as mesmas ensaiadas à flexão a quatro pontos. Um modelo numérico foi desenvolvido com o *software* SAP 2000 para comparação com os dados experimentais. O método da seção transformada foi empregado para a avaliação teórica da resistência e da rigidez das vigas de MLC. As distribuições de deformações obtidas no ensaio de flexão permitiram verificar o comportamento estático das vigas até atingir a ruptura. Os valores de tensões de compressão e tração, tanto para carga de serviço quanto de ruptura, foram próximos aos analíticos e numéricos. A análise das tensões de compressão e tração obtidas por ensaio de flexão permitiram afirmar que as tensões teóricas e numéricas determinadas apresentaram resultados próximos aos resultados experimentais, o que valida as hipóteses adotadas e a modelagem numérica. As deformações obtidas experimentalmente permitiram considerar um comportamento linear das vigas de MLC. Concluiu-se que a modelagem numérica embasada no método dos elementos finitos forneceu resultados satisfatórios que permitem simular o ensaio experimental e estão em consonância com o modelo teórico.

Palavras-chave: método dos elementos finitos, carga de serviço, carga de ruptura, deformações.

CHAPTER IV - ANALYTICAL, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY IN GLULAM BEAMS

Abstract: The objective of this chapter is to carry out the analytical, experimental and numerical evaluation of the structural behavior of glulam beams when subjected to static loads. For the experimental evaluation, 12 beams of glulam of eucalyptus wood were produced and glued with three different adhesives, being tested the flexion at four points. A numerical model was developed with the SAP 2000 software for comparison with the experimental data. The transformed section method was employed for the theoretical evaluation of strength and stiffness of glulam beams. The distributions of deformations obtained in the bending test allowed verifying the static behavior of the beams until reaching failure. The values of compressive and tensile stresses, both for service load and rupture, were close to the analytical and numerical ones. The analysis of the compressive and tensile stresses obtained by bending tests allowed us to state that the determined theoretical and numerical stresses presented results close to the experimental results, which validates the adopted hypotheses and numerical modeling. The deformations obtained experimentally allowed considering a linear behavior of the glulam beams. It was concluded that numerical modeling based on the finite element method provided satisfactory results that allow simulating the experimental test and are in line with the theoretical model.

Keywords: finite element method, service load, failure load, strains.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material de construção renovável que possui alta resistência mecânica em relação à massa, baixo consumo energético para o seu processamento, bom isolamento térmico e fácil trabalhabilidade (YANG et al., 2020; VIDAL et al., 2015). Pelo seu crescimento natural, a madeira não é um material homogêneo e suas características anatômicas afetam significativamente as propriedades do produto e aumentam sua variabilidade em comparação com outros elementos, como concreto e aço.

O desenvolvimento de produtos engenheirados de madeira permite um maior controle das características do material para uso estrutural. Dentre estes produtos, destaca-se a madeira lamelada colada (MLC), que em comparação com a madeira serrada com a mesma área de seção transversal, apresenta teor de umidade uniforme e maior tensão de flexão admissível (GAO et al., 2019).

A produção de MLC embasa-se no uso racional da madeira de reflorestamento, com emprego de lamelas de dimensões relativamente reduzidas. No Brasil, a madeira de *Eucalyptus* sp. surge com potencial para ser utilizada na fabricação de MLC, por ser proveniente de florestas plantadas e pelas propriedades físicas e mecânicas (NOGUEIRA et al., 2023).

O emprego de vigas de MLC produzidas de eucalipto exige a caracterização mecânica, em particular, a verificação da resistência a flexão das peças. Portanto, para garantir a confiabilidade estrutural e melhorar a eficiência construtiva, é necessário que seja realizada uma estimativa da resistência à flexão das vigas em MLC (VIDA et al., 2022a). Para este propósito, existem abordagens teóricas (BLANK et al., 2017; GAO et al., 2019), probabilísticas (FINK; FRANGI; KOHLER, 2015), numéricas (JIANG; SUN, 2022; GEČYS et al. 2020; CEPTELKA; MALO, 2018) e experimentais (DONADON et al., 2020; UZEL et al., 2018).

A maioria das análises numéricas de representação de comportamento estrutural aplicam o método dos elementos finitos (MEF) (ALADE; IBRAHIM; 2023). A aplicação de modelagem numérica embasada no MEF implica na simulação do comportamento real da estrutura, permitindo o uso estrutural eficiente do material (GUINDOS; POLOCOSER, 2015). O MEF é um método numérico aplicável a análise de uma ampla gama de problemas de engenharia para obter soluções aproximadas (TANKUT; TANKUT; ZOR, 2014). Em geral, os modelos desenvolvidos são

associados a ensaios experimentais que utilizam materiais com propriedades aplicadas nas análises, permitindo sua validação.

Tendo em vista a necessidade de utilização racional da madeira de eucalipto de florestas plantadas somada ao potencial de elementos estruturais de MLC para emprego na construção civil e a possibilidade de modelagem utilizando o MEF, este estudo pretende comprovar a hipótese de que a validação numérica por meio do MEF é capaz de representar os valores experimentais obtidos em ensaios realizados em laboratório.

O objetivo deste trabalho é realizar uma avaliação analítica, experimental e numérica do comportamento estrutural de vigas de MLC quando submetidas a carregamentos estáticos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Vigas de MLC foram produzidas utilizando 72 peças de madeira serrada de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* (Figura 1), provenientes da extração de florestas adultas de árvores plantadas na região sudeste do Brasil. As lamelas apresentavam dimensões nominais de 2,5 × 9,3 × 310,7 cm (altura × largura × comprimento), com teor de umidade médio igual a 10,68%.

Os adesivos utilizados para a colagem das lamelas face a face foram resorcinol-formaldeído (RF), poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona (PUR) e melamina-ureia-formaldeído (MUF). Para o estudo foram produzidas 12 vigas estruturais formadas por seis lamelas com 25 mm de espessura. Foram obtidas quatro vigas para cada tipo de adesivo.

Conforme apresentado no Capítulo 3, das extremidades das vigas foram obtidos corpos de prova para a realização de ensaios de caracterização do material engenheirado. As dimensões finais das vigas de MLC foram de 15,0 × 8,5 × 240,0 cm (altura × largura × comprimento).

Figura 1 -Prrensagem das vigas em MLC.

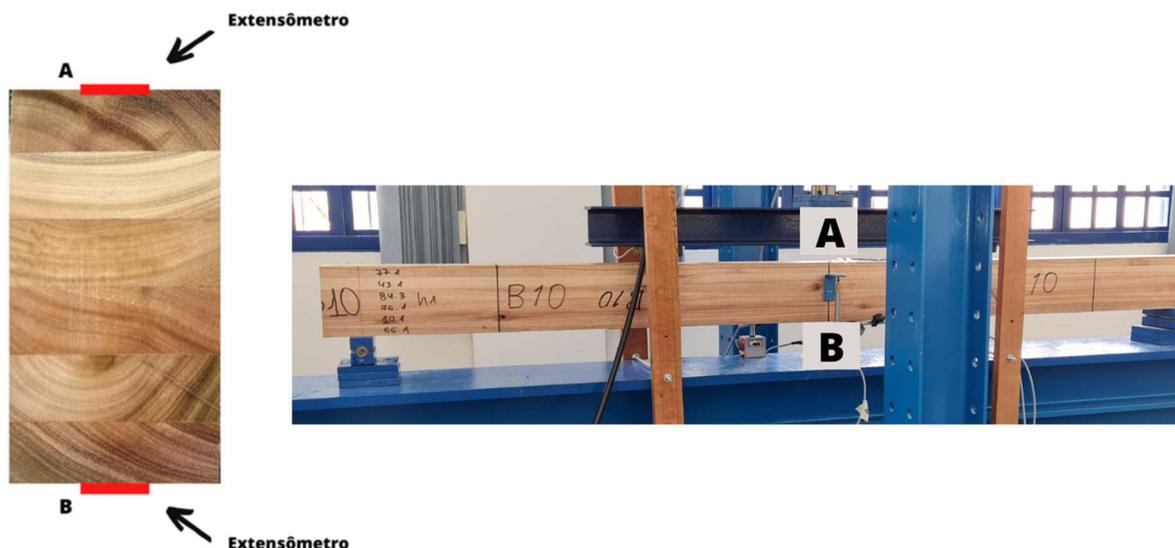


Fonte: o autor.

2.1 Avaliação experimental

O comportamento experimental das vigas de MLC foi avaliado por meio do ensaio de flexão estática a quatro pontos conforme ASTM D 198 (2022). O ensaio de flexão foi executado com um pórtico de cargas com capacidade de 25 toneladas força e *Linear Variable Differential Transformer* (LVDTs) de 50 mm e de 20 mm de curso, respectivamente, na parte inferior do pórtico e no meio do vão da viga. Para a medição das deformações nos pontos de solicitação de esforços de compressão e tração, foram instalados um extensômetro no ponto médio na lamela superior (A) e outro no ponto médio lamela inferior (B), conforme Figura 2, seção central da viga de MLC (Figura 3). Os extensômetros uniaxiais da série Y da *Hottinger Baldwin Measurements* (HBM), possuem geometria linear, comprimento de medição de 10 mm e resistência nominal de 120 Ohm.

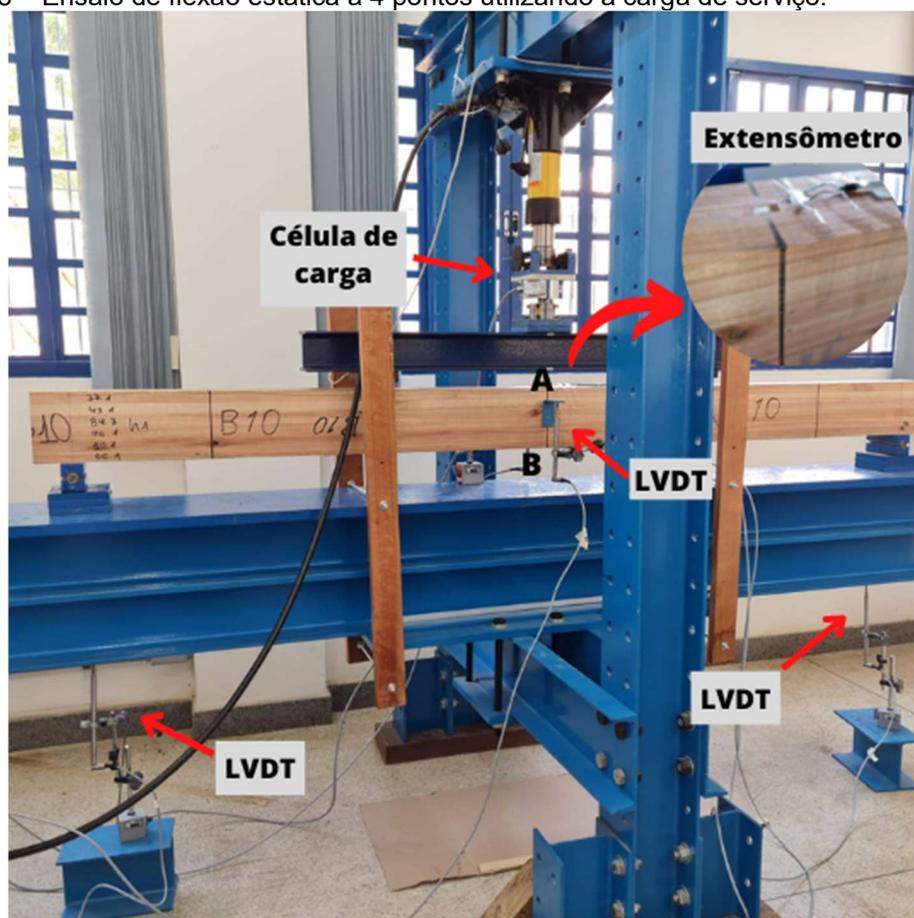
Figura 2 – Esquema de instalação dos extensômetros na seção transversal central do vão da viga.



Fonte: o autor.

Os dados obtidos pelos LVDTs, bem como os obtidos pela célula de carga e extensômetros, foram coletados pelo sistema de aquisição *QuantumX* (DAQ) combinado ao *software* *Catman* da HBM. Na Figura 3 consta o posicionamento dos dispositivos utilizados para a execução do ensaio com aplicação do carregamento por meio de um cilindro hidráulico com acionamento manual. O controle da carga aplicada é por meio da observação do sistema de aquisição.

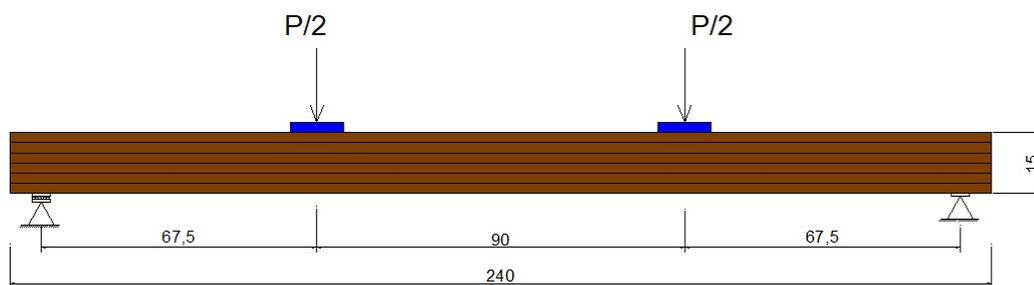
Figura 3 – Ensaio de flexão estática a 4 pontos utilizando a carga de serviço.



Fonte: o autor.

Inicialmente, o carregamento foi aplicado até atingir a flecha máxima igual a $L/200$, em que $L = 225$ cm é o vão entre apoios, de forma a garantir que a rigidez à flexão estivesse no regime elástico linear da viga. O carregamento foi aplicado em dois pontos equidistantes, em que a distância entre os pontos das cargas é igual a $6h$, sendo h a altura da viga. A distância entre um ponto de carga e o ponto de apoio mais próximo foi de $4h$, seguindo as designações da ISO/FDIS 13910 (2013). Na Figura 4 consta o esquema representativo do ensaio de flexão estática. Para este procedimento foram utilizados três ciclos a fim de atingir a acomodação do sistema, sendo o último ciclo culminando com a ruptura da viga.

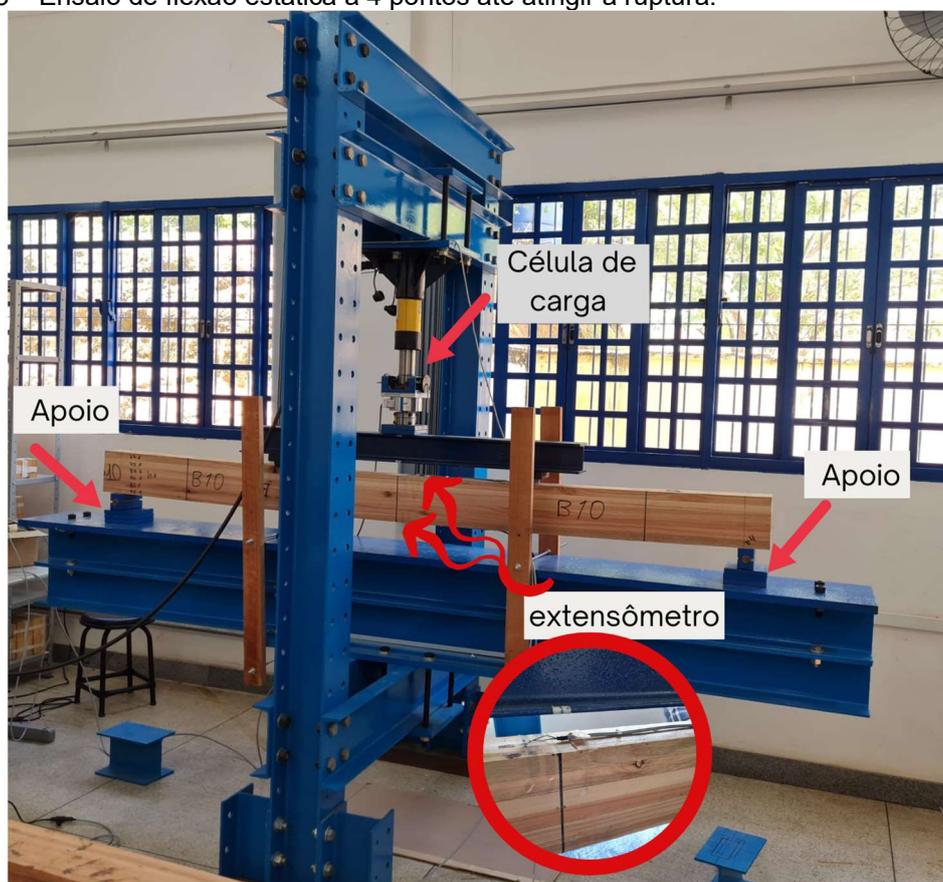
Figura 4 – Esquema representativo do ensaio de flexão estática a 4 pontos.



Fonte: o autor.

Após a realização do ensaio de flexão com o carregamento em regime elástico e o registro das tensões e deslocamentos, procedeu-se a retirada dos LVDt's para, posteriormente, aplicação do carregamento até atingir a ruptura da viga (Figura 5). Para este caso, as tensões foram registradas pelo sistema de aquisição e o modo de ruptura foi definido conforme a ASTM D 143 (2022).

Figura 5 – Ensaio de flexão estática a 4 pontos até atingir a ruptura.



Fonte: o autor.

2.2 Avaliação analítica

O método da seção transformada foi empregado para a avaliação analítica da resistência e da rigidez das vigas de MLC. O método, também conhecido homogeneização da seção, consiste em substituir a seção transversal da viga constituída por lamelas em uma seção equivalente de material homogêneo. Para tanto, as lamelas são consideradas perfeitamente coladas e desconsidera a linha de cola.

Os deslocamentos foram calculados no regime linear incluindo as propriedades das lamelas, em particular o módulo de elasticidade. O momento fletor máximo foi obtido ao considerar uma distribuição linear das deformações ao longo da seção transversal da viga de MLC (DIAS; FIORELLI; MOLINA, 2015). Para o cálculo do deslocamento teórico, utilizou-se a Equação 1.

$$\delta_{teor} = \frac{23 \cdot L^3 \cdot F}{1296 \cdot EI} \quad 1$$

Em que: L – distância entre apoios; F – carga de serviço obtida no ensaio experimental; e EI – módulo de rigidez da seção transformada.

As tensões normais de tração e compressão nas extremidades inferiores e superiores da viga foram obtidas, respectivamente, pelas Equações 2 e 3.

$$\sigma_{teor,t} = E_{l,inf} \cdot \frac{M_{m\acute{a}x}}{EI} y_{inf} \quad 2$$

$$\sigma_{teor,c} = E_{l,sup} \cdot \frac{M_{m\acute{a}x}}{EI} y_{sup} \quad 3$$

Em que: $E_{l,inf}$ – módulo de elasticidade da lamela inferior; $E_{l,sup}$ – módulo de elasticidade da lamela superior; $M_{m\acute{a}x}$ – momento fletor no meio do vão; y_{inf} – distância do centro de gravidade até a fibra mais tracionada; y_{sup} – distância do centro de gravidade até a fibra mais comprimida.

O momento fletor máximo foi calculado considerando a ruptura na madeira devido à tração paralela as fibras. Neste caso, as tensões de tração e compressão foram obtidas com o uso da carga de ruptura. A posição real da linha neutra é obtida por meio de um processo iterativo, tendo em vista que a força resultante pelas tensões normais em todas as camadas é nula.

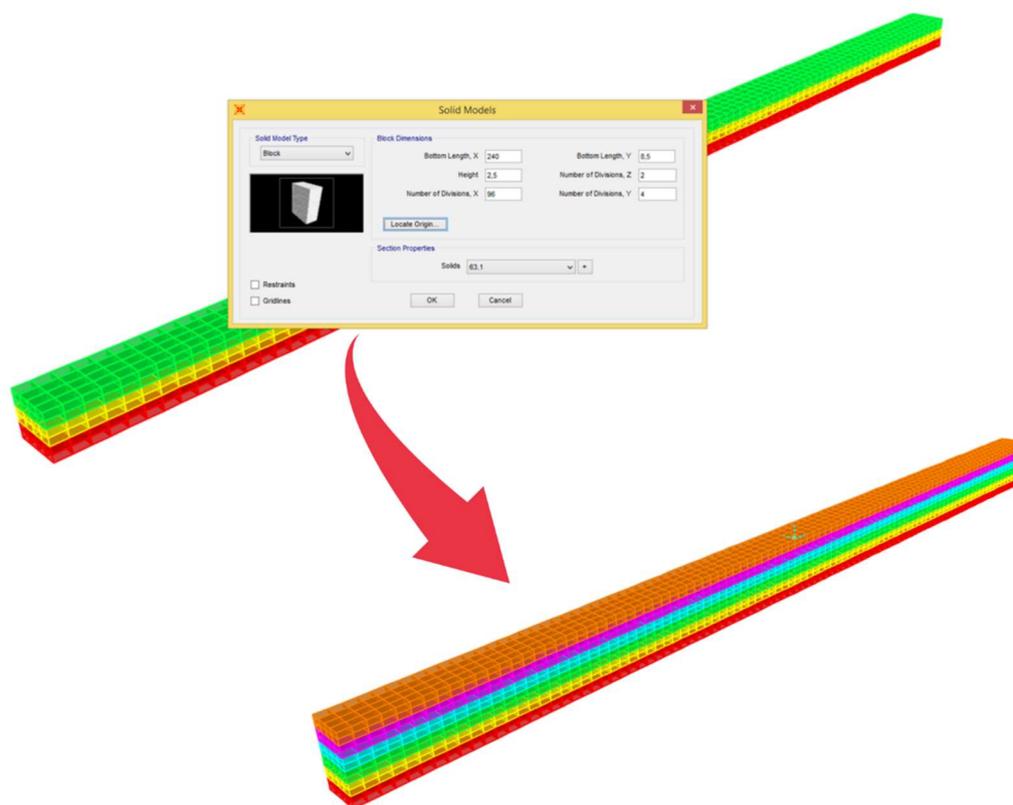
2.3 Avaliação numérica

A avaliação numérica dos deslocamentos e tensões nas vigas de MLC foi realizada por meio do *software Structural Analysis Program - SAP2000*, com o método dos elementos finitos. Para a simulação numérica, a madeira foi considerada um material isotrópico, tendo em vista a análise em relação a flexão simples, em que a direção longitudinal é a predominante (PEIXOTO, SORIANO, PELLIS, 2019). De acordo com Rescalvo et al. (2020), o modelo isotrópico implica em um baixo custo computacional sem influência relevante nos resultados.

O modelo constitutivo das vigas de MLC utilizou como parâmetros de entrada as dimensões reais, a massa específica e o módulo de elasticidade das lamelas, conforme ensaio de flexão estática apresentado no Capítulo 1. O coeficiente de Poisson empregado foi de 0,30, comumente utilizado na literatura para a madeira (VILELA; MASCIA; DONADON, 2019; JIANG; SUN, 2022).

Em todos os modelos, as lamelas foram inseridas individualmente e sobrepostas umas às outras. As ligações entre madeira e adesivo foram consideradas homogêneas e rígidas e os efeitos causados pela colagem do adesivo não foram levados em consideração. As vigas foram representadas por uma malha composta de 6305 nós e discretizadas em 4608 elementos sólidos.

Figura 6 – Montagem da viga em MLC inserindo as lamelas individualmente no *software* SAP2000.



Fonte: o autor.

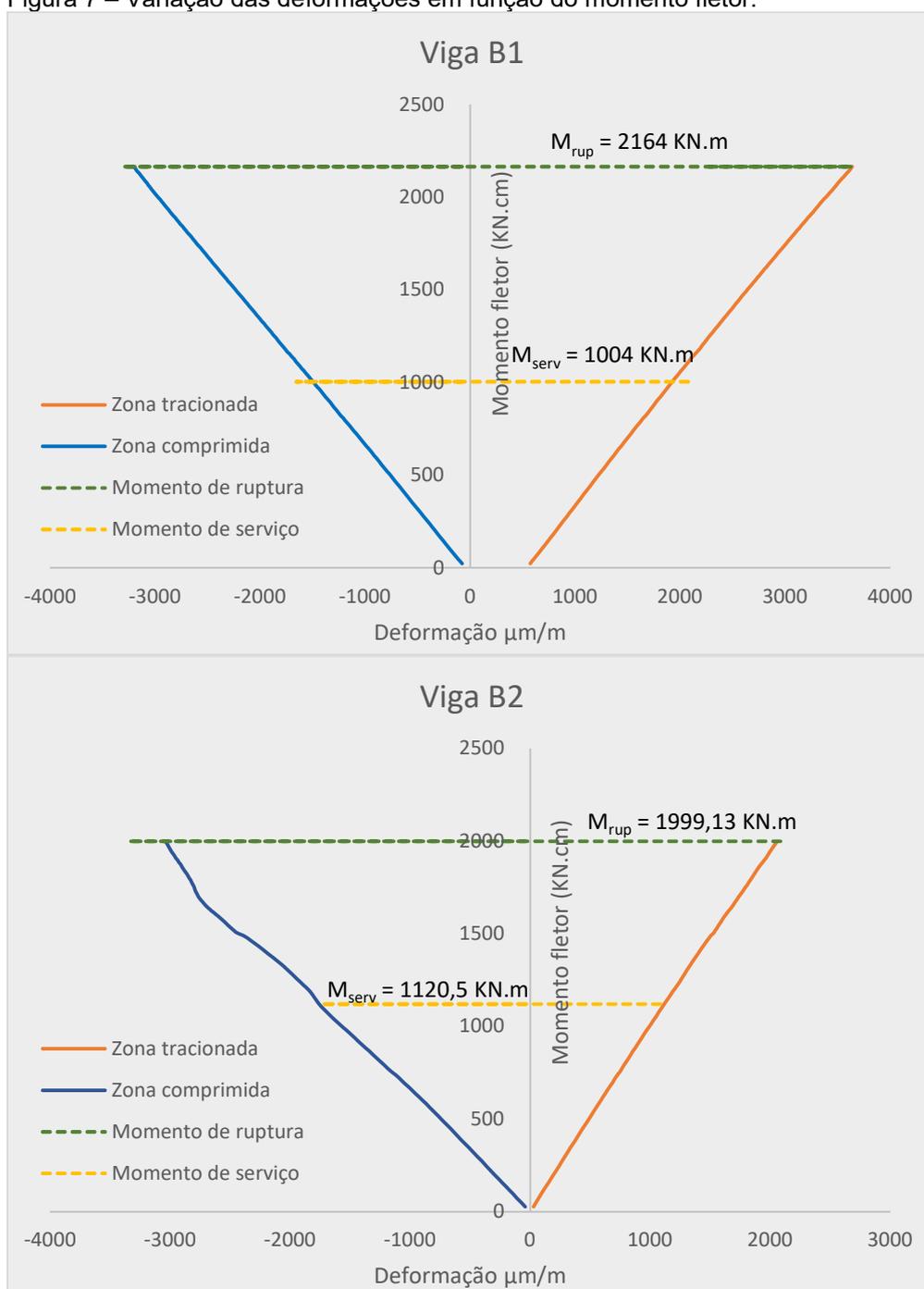
Dois apoios foram inseridos, um fixo e outro rotulado de forma a representar o ensaio de flexão estática. Para a simulação numérica, o carregamento progressivo foi aplicado de acordo com a Figura 4 e os dados obtidos para deslocamentos e tensões foram lidos nos mesmos pontos em que foram obtidos no ensaio de flexão estática. Os resultados numéricos foram comparados com os dados experimentais e teóricos para a validação dos modelos.

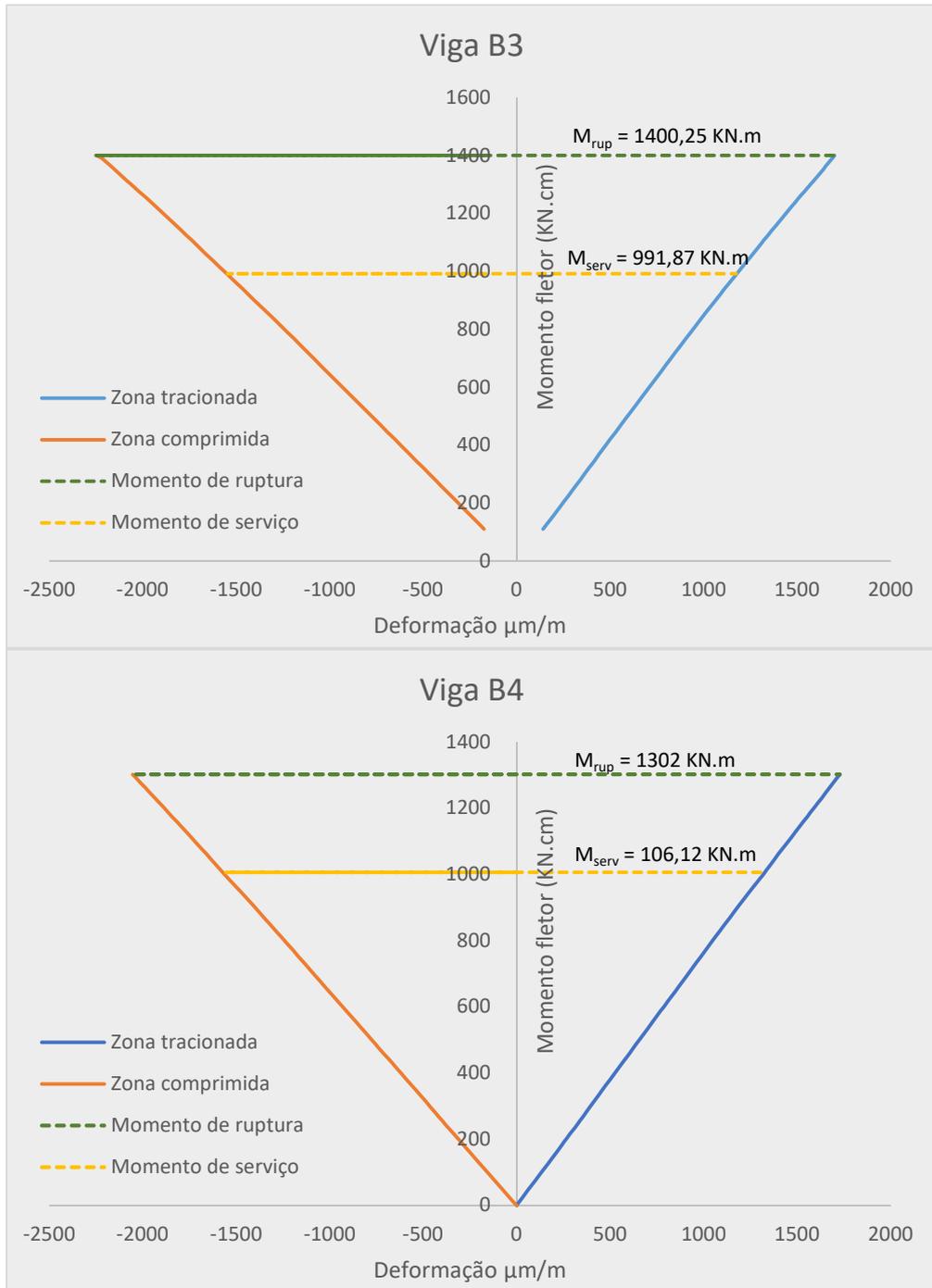
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

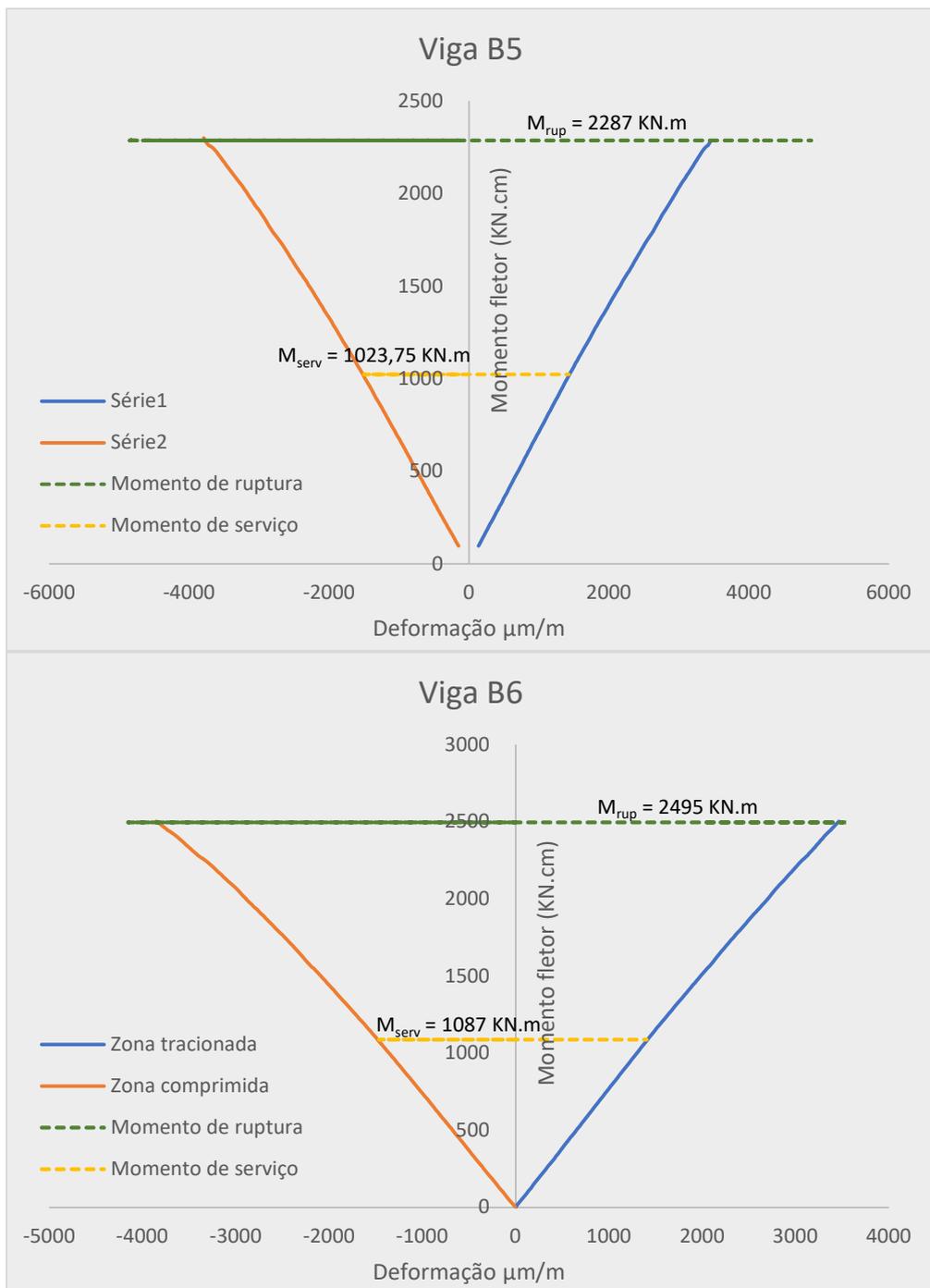
3.1 Análise das deformações

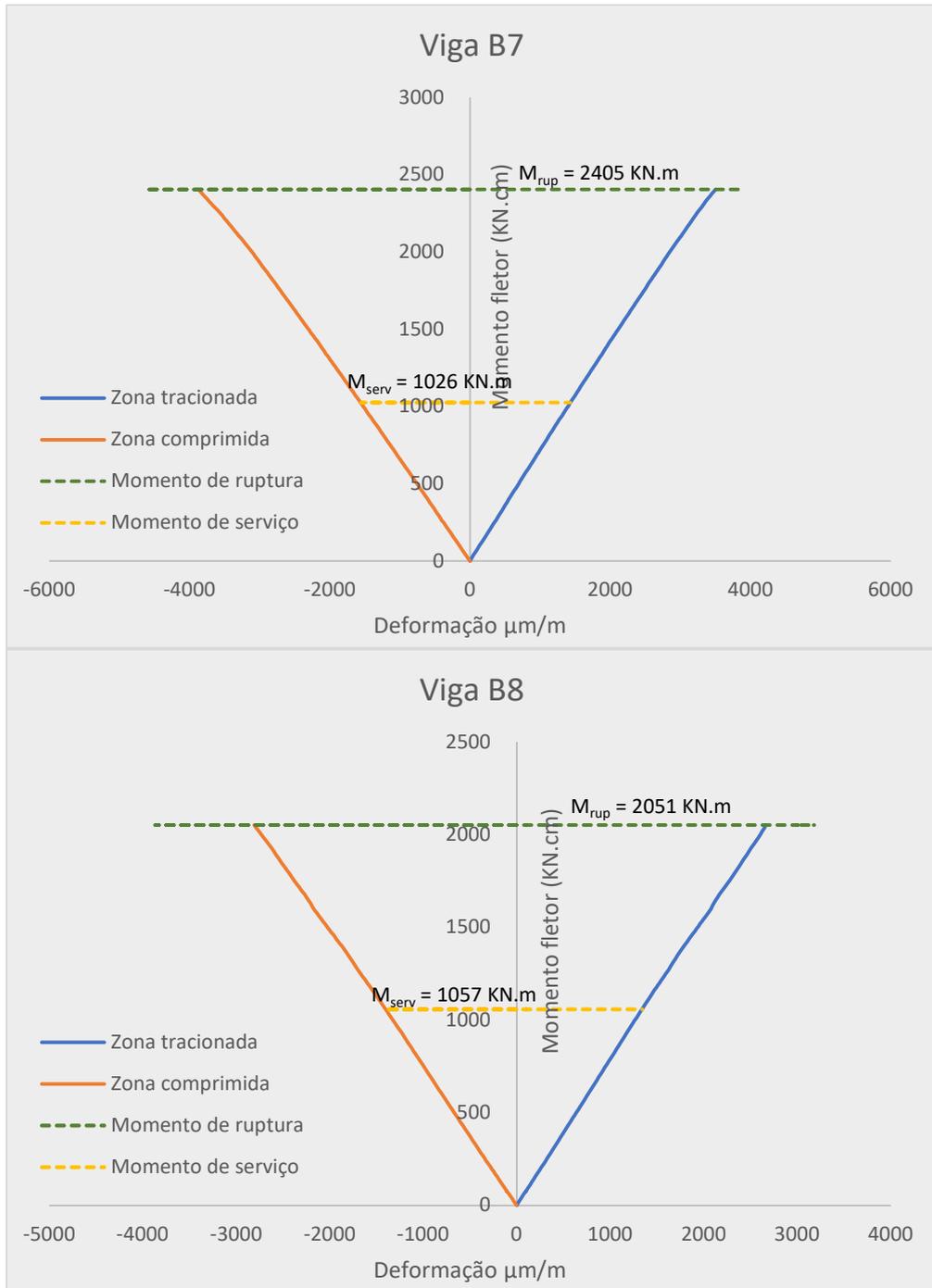
Na Figura 7 consta a variação da deformação em função do momento fletor atuante nas vigas de MLC de acordo com o ensaio experimental de flexão a quatro pontos.

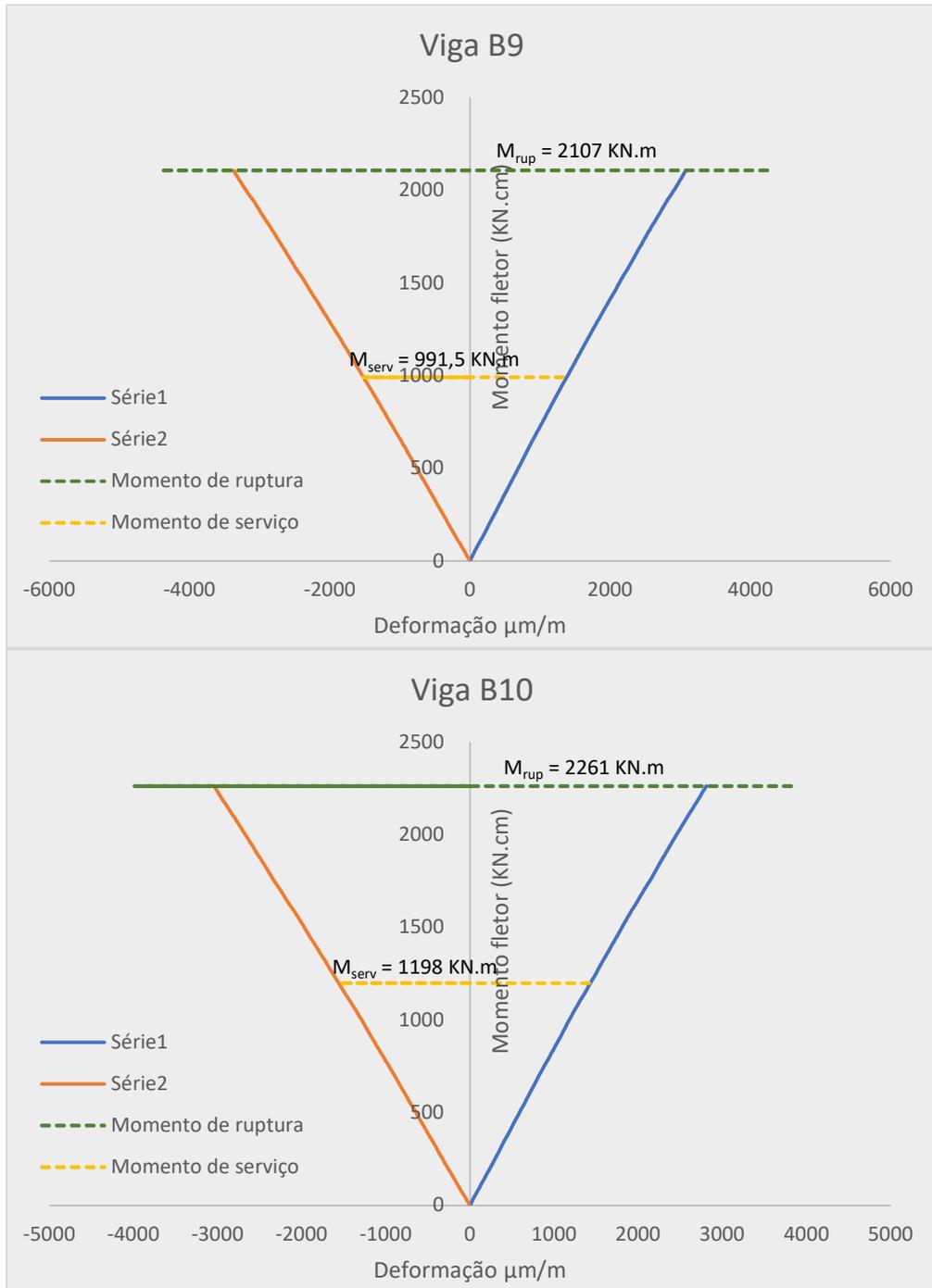
Figura 7 – Variação das deformações em função do momento fletor.

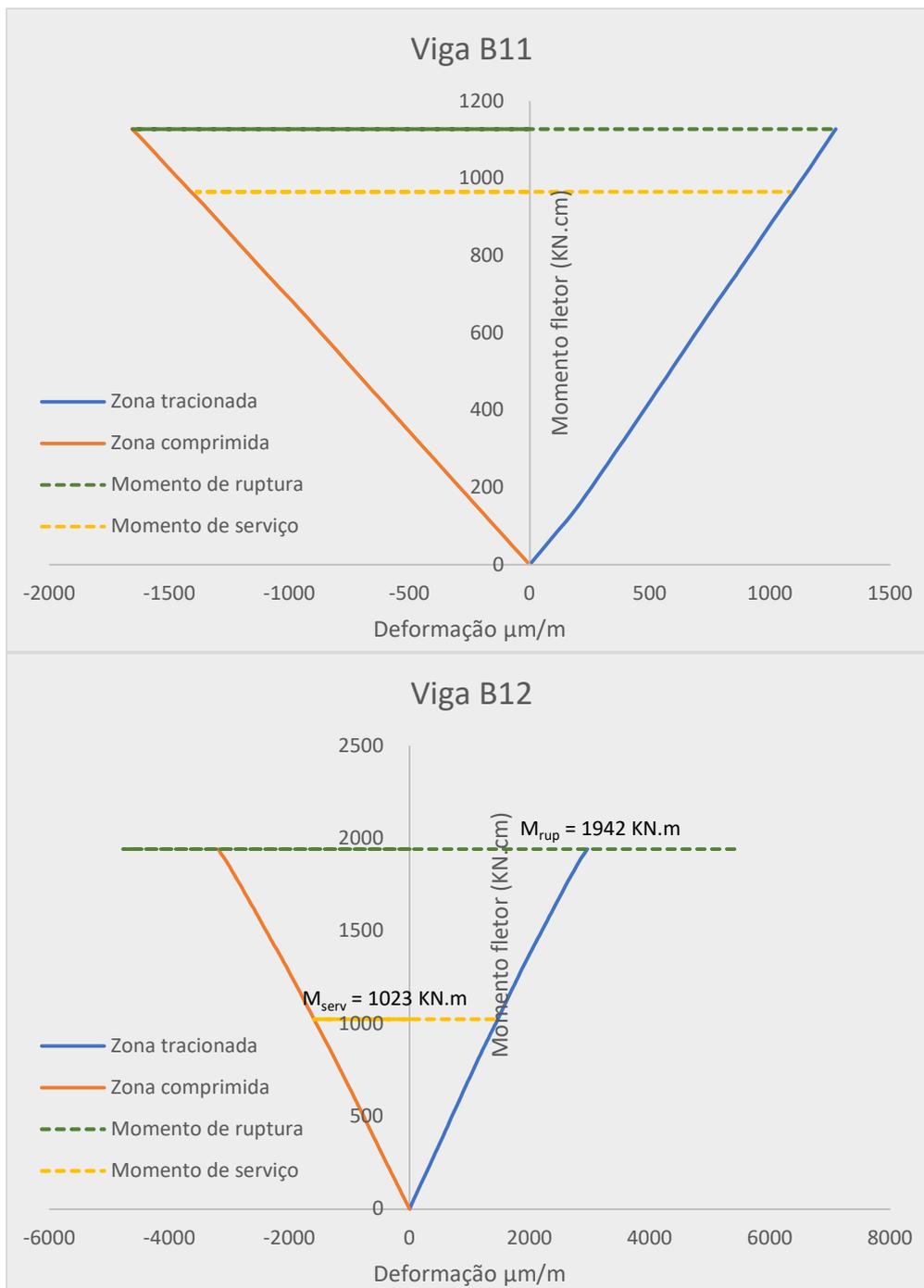












Fonte: o autor.

A linha tracejada em verde representa o momento fletor de ruptura, estimado com base na carga de ruptura obtida no ensaio experimental. A linha tracejada em amarelo representa o momento fletor calculado de acordo com a carga de serviço, adotada com base na flecha. Este momento é uma estimativa embasada nos ciclos anteriores ao carregamento de ruptura, tendo em vista que no último ciclo os LVDT's

foram retirados e não houve leitura de deslocamento. Tal procedimento é realizado visando a preservação dos medidores (DONADON et al.; 2020).

A pesquisa de Gao et al. (2019) investigou a rigidez de vigas de MLC no ensaio de flexão a quatro pontos. O comportamento dos corpos de prova permaneceu linear e não houve redução significativa da rigidez até a ocorrência da ruptura. Além disso, a lamela inferior foi responsável pela maior influência na resistência e rigidez do elemento estrutural.

No estudo de vigas de MLC ensaiadas a flexão a quatro pontos, um conjunto de extensômetros foi fixado nas laterais da seção transversal do meio do vão para avaliar o possível comportamento não linear da viga e localizar seu eixo neutro (GLIŠOVIĆ; STEVANOVIĆ; TODOROVIĆ, 2016). Observou-se uma distribuição linear das deformações até a ruptura para todas as vigas, não havendo alteração na posição da linha neutra, conforme previsto pelas teorias lineares.

Entretanto, Baño et al. (2011) ressalta que antes de atingir a ruptura, ocorrem rupturas parciais das peças, as quais podem ser causadas por defeitos como nós. Quando um nó está localizado na região de tração da viga, ocorrem tensões paralelas as fibras e tensões de cisalhamento.

À medida que o carregamento é aplicado, o plano neutro da viga se desloca para o lado tracionado. Na fase inicial de deformação, a distribuição de tensões é considerada linear. Com o aumento da carga é alcançado o limite de proporcionalidade das tensões, iniciando-se a plastificação da região comprimida. Deve-se observar que uma vez que a viga tenha sido submetida a tensões acima do limite proporcional, a relação linear entre tensão e deformação não é mais válida (BODIG; JAYNE, 1982).

3.2 Carga de serviço

Na Tabela 1 consta as tensões normais teóricas (σ_{teor}), experimental (σ_{exp}), numérica (σ_{num}) e numérica sem peso próprio ($\sigma_{\text{num,spp}}$) para a carga de serviço das vigas estudadas, bem como a relação entre a tensão normal experimental e as demais.

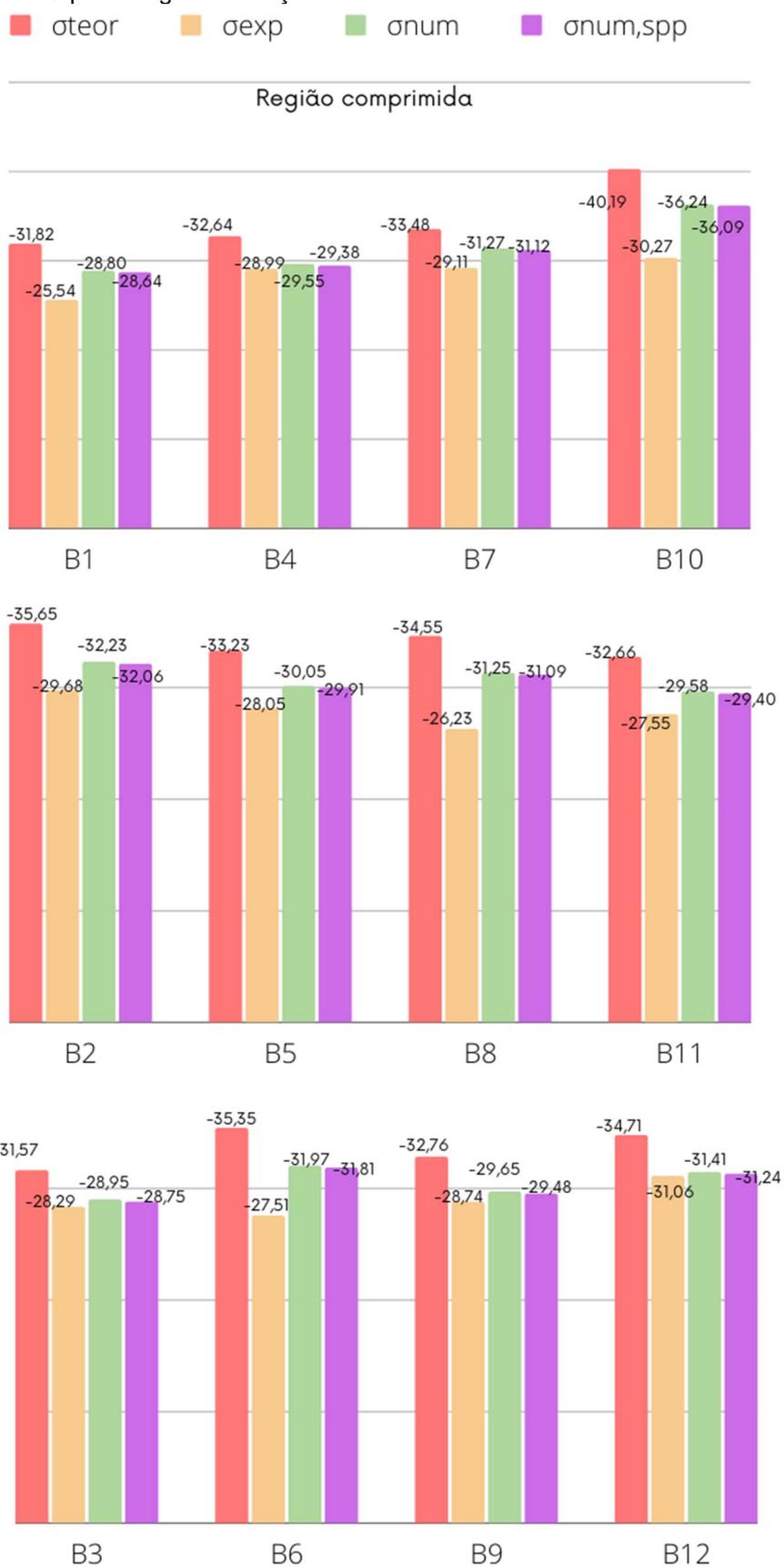
Tabela 1 – Carga de serviço e as correspondentes tensões teórica, experimental, numérica e numérica sem peso próprio e relação entre tensões.

| VIGA | F (KN) | Zona de tensão | σ_{teor} (MPa) | σ_{exp} (MPa) | σ_{num} (MPa) | $\sigma_{num,spp}$ (MPa) | $\sigma_{exp}/$ σ_{teor} | $\sigma_{exp}/$ σ_{num} | $\sigma_{exp}/$ $\sigma_{num,spp}$ |
|------|-----------|-------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| B1 | 26,77 | Compressão | -31,82 | -25,54 | -28,80 | -28,64 | 0,80 | 0,89 | 0,89 |
| | | Tração | 36,90 | 32,06 | 33,40 | 33,22 | 0,87 | 0,96 | 0,97 |
| B2 | 29,88 | Compressão | -35,65 | -29,68 | -32,23 | -32,06 | 0,83 | 0,92 | 0,93 |
| | | Tração | 40,81 | 25,99 | 36,98 | 36,79 | 0,64 | 0,70 | 0,71 |
| B3 | 26,46 | Compressão | -31,57 | -28,29 | -28,95 | -28,75 | 0,90 | 0,98 | 0,98 |
| | | Tração | 35,66 | 26,70 | 32,23 | 32,02 | 0,75 | 0,72 | 0,73 |
| B4 | 34,72 | Compressão | -32,64 | -28,99 | -29,55 | -29,38 | 0,89 | 0,98 | 0,99 |
| | | Tração | 35,74 | 29,79 | 32,36 | 32,18 | 0,83 | 0,92 | 0,93 |
| B5 | 27,30 | Compressão | -33,23 | -28,05 | -30,05 | -29,91 | 0,84 | 0,93 | 0,94 |
| | | Tração | 36,09 | 31,67 | 32,64 | 32,48 | 0,88 | 0,97 | 0,98 |
| B6 | 29,00 | Compressão | -35,35 | -27,51 | -31,97 | -31,81 | 0,78 | 0,86 | 0,86 |
| | | Tração | 38,20 | 31,05 | 34,55 | 34,38 | 0,81 | 0,90 | 0,90 |
| B7 | 27,36 | Compressão | -33,48 | -29,11 | -31,27 | -31,12 | 0,87 | 0,93 | 0,94 |
| | | Tração | 35,82 | 31,20 | 33,46 | 32,99 | 0,87 | 0,93 | 0,95 |
| B8 | 28,21 | Compressão | -34,55 | -26,23 | -31,25 | -31,09 | 0,76 | 0,84 | 0,84 |
| | | Tração | 36,59 | 28,70 | 33,09 | 32,92 | 0,78 | 0,87 | 0,87 |
| B9 | 26,44 | Compressão | -32,76 | -28,74 | -29,65 | -29,48 | 0,88 | 0,97 | 0,97 |
| | | Tração | 34,00 | 29,09 | 30,77 | 30,60 | 0,86 | 0,95 | 0,95 |
| B10 | 31,97 | Compressão | -40,19 | -30,27 | -36,24 | -36,09 | 0,75 | 0,84 | 0,84 |
| | | Tração | 40,62 | 29,77 | 36,75 | 36,59 | 0,73 | 0,81 | 0,81 |
| B11 | 25,75 | Compressão | -32,66 | -27,55 | -29,58 | -29,40 | 0,84 | 0,93 | 0,94 |
| | | Tração | 32,00 | 24,15 | 28,99 | 28,81 | 0,75 | 0,83 | 0,84 |
| B12 | 27,30 | Compressão | -34,71 | -31,06 | -31,41 | -31,24 | 0,89 | 0,99 | 0,99 |
| | | Tração | 33,74 | 29,18 | 30,53 | 30,37 | 0,86 | 0,96 | 0,96 |

Os resultados experimentais apresentaram variação de até 15% em relação a análise teórica e numéricas, exceto para as vigas B2 e B3, que atingiram valores superiores quando comparadas as tensões de tração. Isso pode ter sido ocasionado por algum defeito interno da lamela inferior, onde se concentram os esforços de tração.

Nas Figura 8 e Figura 9 constam as tensões de compressão e tração obtidas de forma teórica, experimental, numérica e numérica sem peso próprio das vigas em MLC para a carga de serviço, com o objetivo de melhor visualização.

Figura 8 – Tensão de compressão (teórica, experimental, numérica e numérica sem peso próprio) das vigas em MLC para carga de serviço.



Fonte: o autor.

Figura 9 – Tensão de tração (teórica, experimental, numérica e numérica sem peso próprio) das vigas em MLC para carga de serviço.



Fonte: o autor.

As tensões de tração e compressão experimentais foram inferiores as tensões numéricas e analíticas, o que corrobora para avaliação de projeto com emprego de métodos teóricos e modelos numéricos, já que tensões e deformações na estrutura não devem exceder os limites de resistência e deformação de projeto (AUTENGRUBER et al., 2020).

Para o estudo analítico e numérico de vigas de MLC, Tsalkatidis (2014) utilizou o *software* ANSYS para a simulação com o emprego da carga de serviço obtida pelo deslocamento máximo calculado. Dois modelos tridimensionais foram desenvolvidos, em um destes as camadas adesivas não foram consideradas. Isso não ocasionou diferenças significativas nos resultados obtidos. A modelagem numérica, que considerou os mesmos carregamentos e condições de apoio na viga, foi validada pelo estudo experimental.

No presente estudo, as linhas de cola também não foram representadas na simulação numérica. Para avaliação da estrutura cada lamela foi aplicada no modelo individualmente com suas propriedades mecânicas e apresentaram resultados condizentes, conforme observado por Shakimon et al. (2016), em sua pesquisa para avaliação de vigas em MLC, com madeira tropical submetidas à flexão.

3.3 Carga de ruptura

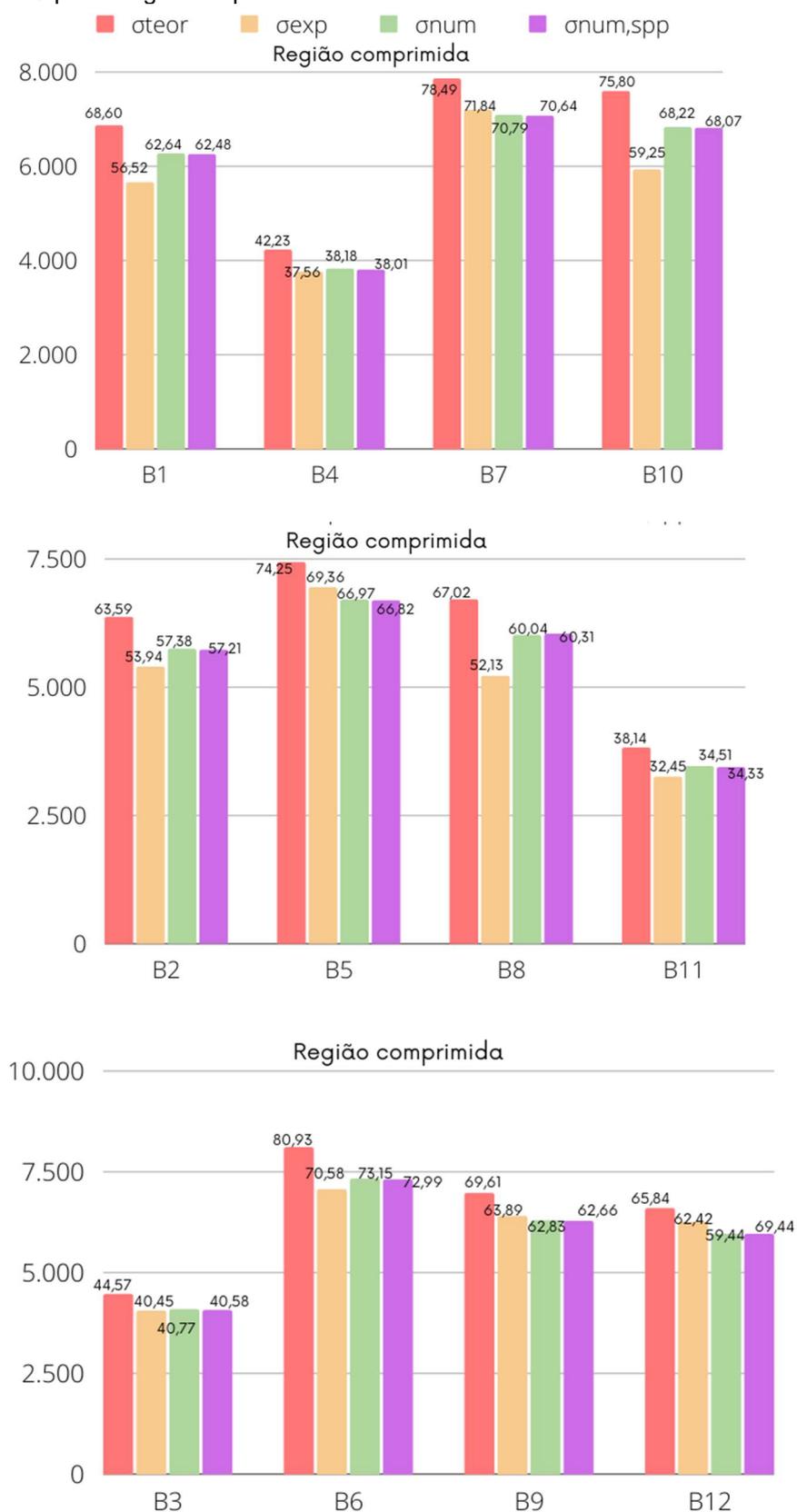
Na Tabela 2 constam as tensões teórica (σ_{teor}), experimental (σ_{exp}), numérica (σ_{num}) e numérica sem peso próprio ($\sigma_{\text{num, spp}}$) para a carga de ruptura das vigas estudadas, bem como a relação entre a tensão experimental e as demais.

Tabela 2 – Carga de ruptura e as correspondentes tensões teórica, experimental, numérica e numérica sem peso próprio e relação entre tensões.

| VIGA | F (KN) | Zona de tensão | σ_{teor} (MPa) | σ_{exp} (MPa) | σ_{num} (MPa) | $\sigma_{num,spp}$ (MPa) | $\sigma_{exp}/$ σ_{teor} | $\sigma_{exp}/$ σ_{num} | $\sigma_{exp}/$ $\sigma_{num,spp}$ |
|------|-----------|-------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| B1 | 57,73 | Compressão | -68,60 | -56,52 | -62,64 | -62,48 | 0,82 | 0,90 | 0,90 |
| | | Tração | 79,56 | 77,20 | 72,65 | 72,46 | 0,97 | 1,06 | 1,06 |
| B2 | 53,31 | Compressão | -63,59 | -53,94 | -57,38 | -57,21 | 0,84 | 0,94 | 0,94 |
| | | Tração | 72,81 | 59,33 | 65,84 | 65,65 | 0,81 | 0,90 | 0,90 |
| B3 | 37,34 | Compressão | -44,57 | -40,45 | -40,77 | -40,58 | 0,91 | 0,99 | 1,00 |
| | | Tração | 50,33 | 38,00 | 45,40 | 45,19 | 0,76 | 0,84 | 0,84 |
| B4 | 34,72 | Compressão | -42,23 | -37,56 | -38,18 | -38,01 | 0,89 | 0,98 | 0,99 |
| | | Tração | 46,24 | 38,20 | 41,81 | 41,62 | 0,83 | 0,91 | 0,92 |
| B5 | 61,00 | Compressão | -74,25 | -69,36 | -66,97 | -66,82 | 0,93 | 1,03 | 1,04 |
| | | Tração | 80,65 | 75,71 | 72,74 | 72,58 | 0,94 | 1,04 | 1,04 |
| B6 | 66,40 | Compressão | -80,93 | -70,58 | -73,15 | -72,99 | 0,87 | 0,96 | 0,97 |
| | | Tração | 87,46 | 75,00 | 79,05 | 78,88 | 0,86 | 0,97 | 0,95 |
| B7 | 64,14 | Compressão | -78,49 | -71,84 | -70,79 | -70,64 | 0,92 | 1,01 | 1,01 |
| | | Tração | 83,98 | 75,53 | 75,74 | 75,58 | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| B8 | 54,70 | Compressão | -67,02 | -52,13 | -60,04 | -60,31 | 0,78 | 0,87 | 0,86 |
| | | Tração | 70,96 | 56,59 | 64,03 | 63,86 | 0,80 | 0,88 | 0,90 |
| B9 | 56,19 | Compressão | -69,61 | -63,89 | -62,83 | -62,66 | 0,92 | 1,02 | 1,02 |
| | | Tração | 72,25 | 64,87 | 65,21 | 65,04 | 0,90 | 0,99 | 1,00 |
| B10 | 60,31 | Compressão | -75,80 | -59,25 | -68,22 | -68,07 | 0,79 | 0,87 | 0,87 |
| | | Tração | 76,63 | 61,05 | 69,17 | 69,01 | 0,80 | 0,88 | 0,88 |
| B11 | 30,08 | Compressão | -38,14 | -32,45 | -34,51 | -34,33 | 0,85 | 0,94 | 0,95 |
| | | Tração | 37,38 | 25,63 | 33,82 | 33,64 | 0,69 | 0,76 | 0,76 |
| B12 | 51,79 | Compressão | -65,84 | -62,42 | -59,44 | -59,44 | 0,94 | 1,05 | 1,05 |
| | | Tração | 64,01 | 64,22 | 57,78 | 57,78 | 1,00 | 1,11 | 1,11 |

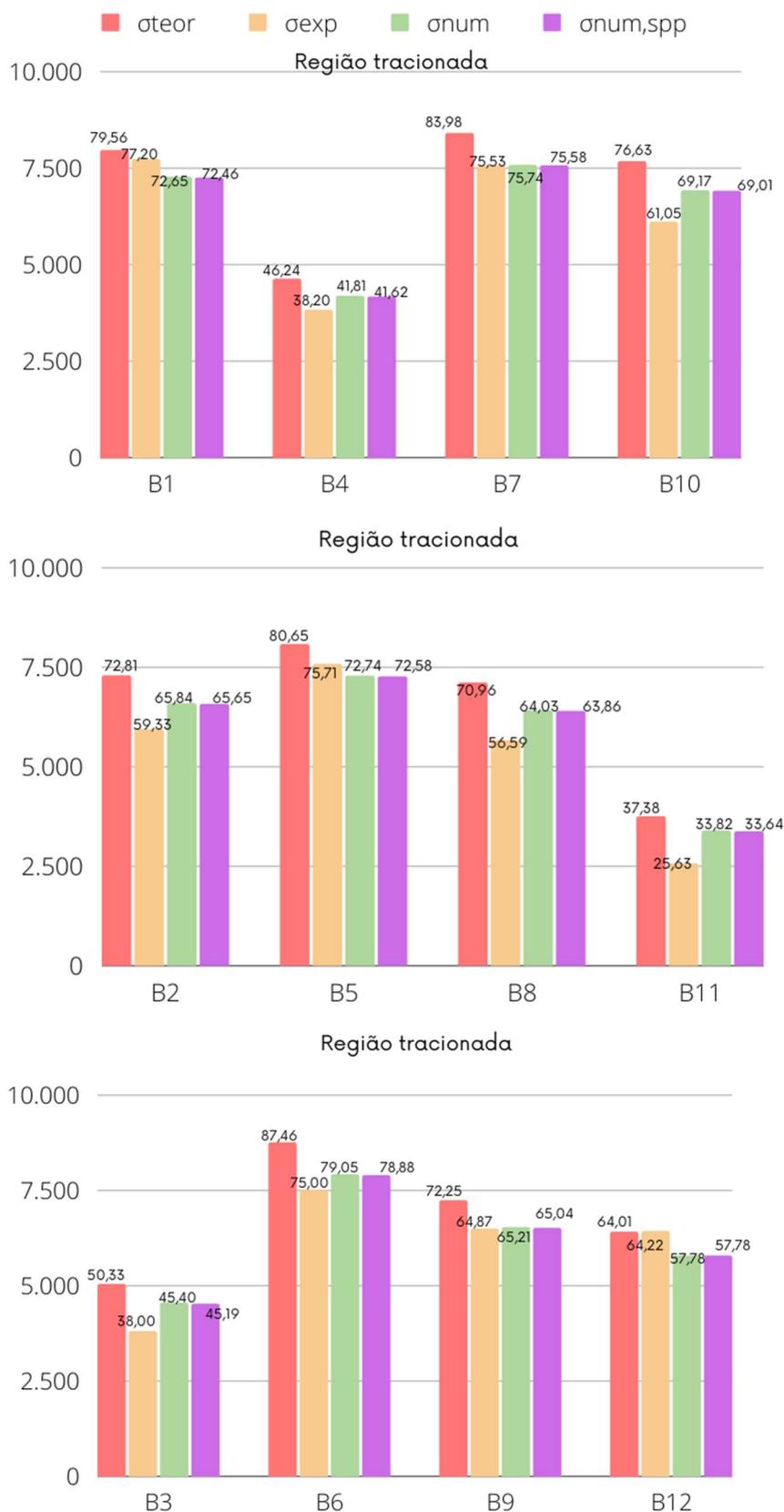
Nas Figura 10 e Figura 11 observa-se, respectivamente, as tensões de compressão e tração (teórica, experimental, numérica e numérica sem peso próprio) das vigas em MLC para carga de ruptura.

Figura 10 – Tensão de compressão (teórica, experimental, numérica e numérica sem peso próprio) das vigas em MLC para carga de ruptura.



Fonte: o autor.

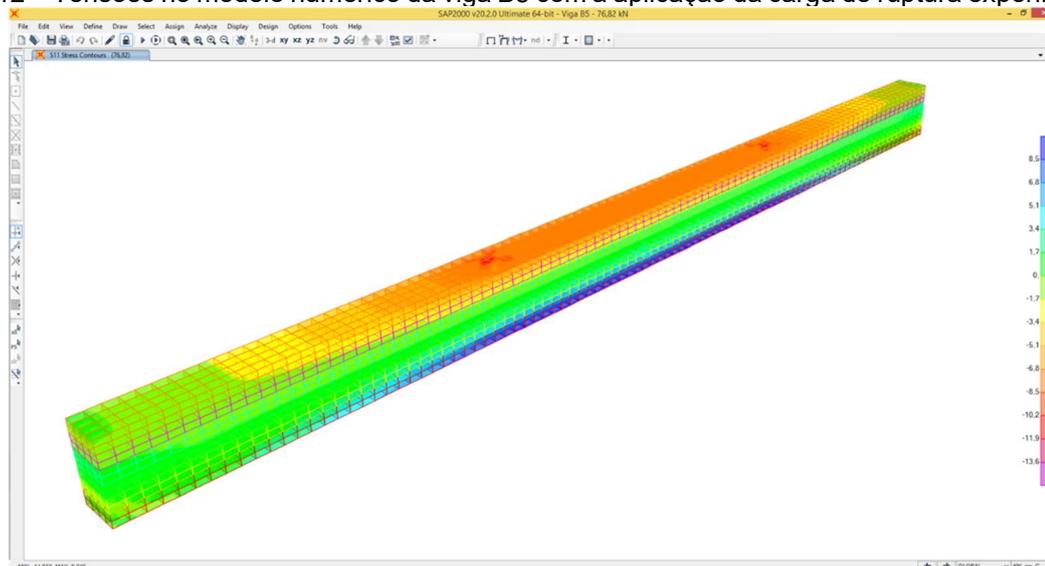
Figura 11 – Tensão de tração (teórica, experimental, numérica e numérica sem peso próprio) das vigas em MLC para carga de ruptura.



Fonte: o autor.

A Figura 12 mostra o gráfico de tensões da viga B5, quando aplicada a carga de ruptura experimental.

Figura 12 – Tensões no modelo numérico da viga B5 com a aplicação da carga de ruptura experimental.



Fonte: o autor.

Os valores de tensões de compressão e tração, tanto para carga de serviço quanto de ruptura, foram próximos aos analíticos e numéricos. De forma geral, observa-se que os resultados experimentais de tensões foram menores que os demais estudados.

Os resultados experimentais e numéricos para carga de ruptura e rigidez foram comparados para uma estrutura contendo vigas e pilares em MLC no estudo de Jiang e Sun (2022). A relação entre os resultados experimentais e numéricos para cada modelo e corpo de prova analisado foi considerado válido, quando o erro foi inferior a 20%.

A análise realizada por Uzel et al. (2018) também considera que erros inferiores a 20% permitem a validação de modelos numéricos, quando comparados a resultados experimentais para vigas em MLC ensaiadas à flexão. No presente estudo, somente as vigas B6 e B11 não obtiveram erro inferior a 20%, para a tensão de tração, conforme sugerido nos estudos de Jiang e Sun (2022) e Uzel (2018).

As variações ocorridas podem ter sido ocasionadas por defeitos internos, não visíveis, que afetaram a resistência da lamela inferior, onde se concentram as tensões de tração da viga, local em que há maior probabilidade de ruptura frágil (TSALKATIDIS, 2014; JIANG; SUN, 2022). Blank et al. (2017) afirmam em seu estudo sobre ruptura frágil em vigas de MLC que, na maioria dos casos, a falha na estrutura

quando submetida a esforços de flexão é iniciada nas proximidades de defeitos localizados nas regiões altamente solicitadas.

Deve-se observar que a consideração de mecanismos de ruptura em simulações numéricas não é de simples implementação, o que limita a aplicabilidade do modelo quando se trata de representar as rupturas ocorridas nas vigas de MLC (CAMÚ, 2022). A precisão dos modelos de elementos finitos desenvolvidos para a simulação de vigas de MLC pode ser aprimorada com estudos focados nos mecanismos de ruptura apropriados e modelos para madeira implementados nos *softwares* utilizados no mercado (SAAD, K.; LENGYEL; UZEL et al, 2018).

Alguns estudos numéricos buscam considerar na modelagem de elementos em MLC a presença de nós (VIDA et al., 2022a; SARNAGHI; VAN DE KUILEN, 2019) e fissuras nas lamelas (VIDA et al., 2022b; TAPIA; AICHER, 2022). A variabilidade natural do material lenhoso, ou seja, das propriedades da madeira devido à distribuição aleatória das características de crescimento. A variação morfológica e o arranjo dos nós levam a inconstância das propriedades de resistência ao longo das lamelas, o que promove mecanismos de ruptura estrutural complexos e, em geral, bastante frágeis dos elementos em MLC (VIDA et al., 2022; BLANK et al., 2017).

No estudo de Frese (2016) é realizada uma análise comparativa entre simulação numérica e métodos analíticos correspondentes para MLC. A modelagem foi implementada considerando o material com ruptura frágil por tração. O autor conclui que tanto o procedimento numérico quanto o analítico levaram a resultados semelhantes entre as resistências determinadas numericamente e analiticamente. Portanto, métodos analíticos correspondentes são uma ferramenta útil para verificar e validar procedimentos computacionais.

Vigas de MLC homogêneas e híbridas foram testadas experimentalmente utilizando ensaio à flexão de 4 pontos (SCIOMENTA et al., 2022). Os resultados experimentais foram comparados a modelos numéricos para a validação da simulação computacional. Os autores verificaram que a análise experimental e numérica demonstra as vantagens da utilização de vigas de MLC, em particular com configuração balanceada em que as camadas internas são produzidas de lamelas com material de baixa resistência.

De forma geral, a análise das tensões de compressão e tração das vigas ensaiadas experimentalmente permite afirmar que, as tensões teóricas e numéricas

determinadas apresentaram resultados próximos, validando as hipóteses adotadas e a modelagem numérica.

3.4 Modo de ruptura

Todas as vigas receberam carregamento até atingir a ruptura. Ao finalizar o ensaio de flexão, o modo de ruptura foi registrado de acordo com a ASTM D 143 (2022). Na Figura 13 constam os modos de ruptura das vigas em MLC coladas com o adesivo PUR, ainda posicionadas no pórtico.

Figura 13 – Modos de ruptura das vigas coladas com PUR: B1 – por cisalhamento; B4 – por cisalhamento; B7 – por tração; B10 – por tração e por cisalhamento.



Fonte: o autor.

Na Figura 14 observa-se as vigas em MLC coladas com PUR dispostas em plano horizontal após a retirada destas do pórtico em que foram ensaiadas. A ruptura das vigas B1, B4 e B10 foi causada por cisalhamento paralelo ao plano de colagem.

Figura 14 – Vigas coladas com PUR após a ruptura.



Fonte: o autor.

Vigas em MLC são elementos estruturais com variabilidade reduzida em relação a madeira maciça por causa do balanceamento realizado. Com este procedimento, seções locais com menores resistências, como grupos de nós, são distribuídas de forma mais homogênea que em madeira maciça. Assim, a influência de defeitos é minimizada e as seções de menor resistência são reforçadas por lamelas adjacentes com resistência superior (FINK; FRANGI; KOLHER, 2015). Em geral, a falha por flexão em vigas de MLC ocorre principalmente pela ruptura na zona tracionada (BLANK et al., 2017). Este modo de ruptura foi observado em todas as vigas de MLC coladas com RF (Figura 14).

Figura 15 – Modos de ruptura das vigas coladas com RF: B2 – por tração e por compressão; B5 – por tração e por compressão; B8 – por tração; B11 – por tração.



Fonte: o autor.

Na Figura 16 nota-se as vigas em MLC coladas com RF dispostas em plano horizontal após a retirada destas do pórtico em que foram ensaiadas. As vigas B2 e B5 romperam, inicialmente, por tração e depois por compressão. Deve-se observar que a flexão resulta em tensões longitudinais de tração e compressão distribuídas ao longo da seção transversal. A tensão de tração leva a uma ruptura frágil pela ruptura das fibras de madeira. A tensão de compressão longitudinal resulta em deformações elásticas e plásticas que podem ser descritas como dúcteis (FRANKE; FRANKE; HARTE, 2015).

Figura 16 – Vigas coladas com RF após a ruptura.

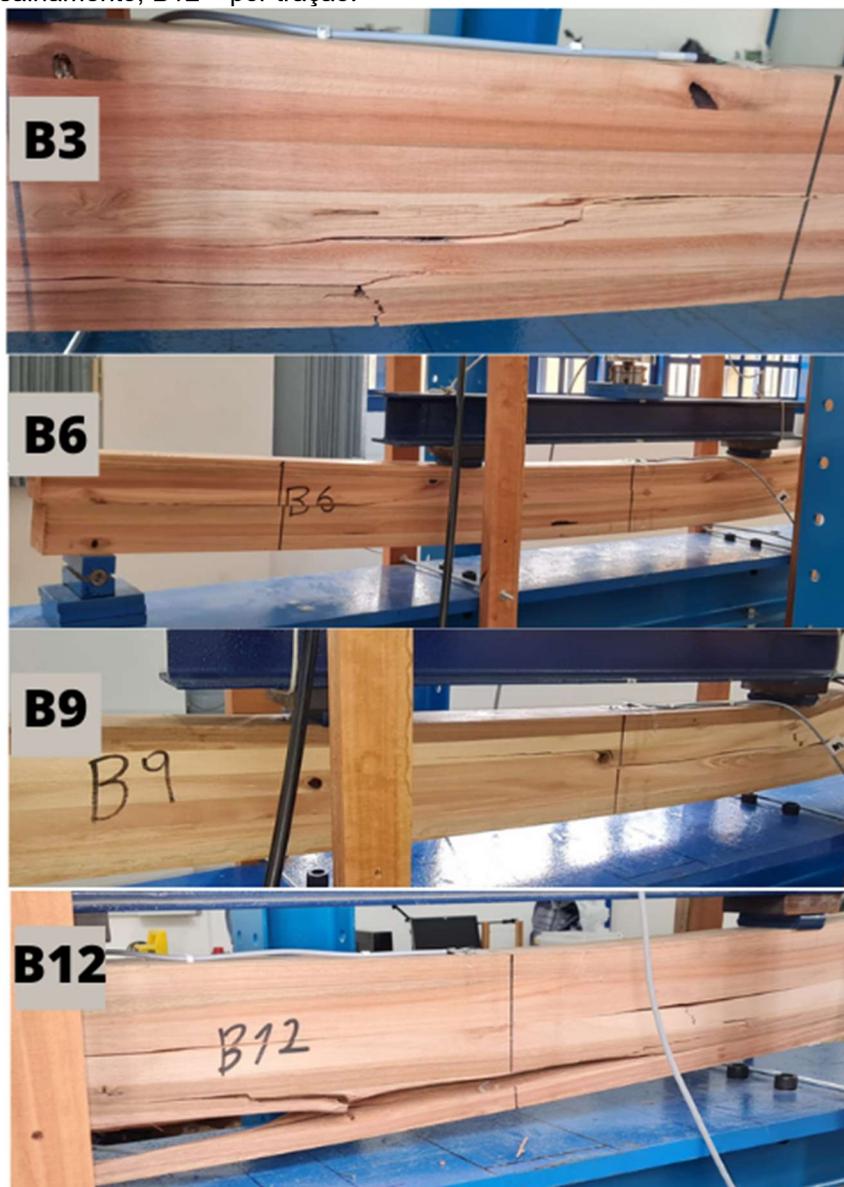


Fonte: o autor.

As vigas em MLC coladas com MUF apresentaram ruptura por tração (B3 e B12) e por cisalhamento (B6 e B9), conforme observado na Figura 17.

Em geral, a ruptura por cisalhamento em vigas ocorre próximo aos apoios, onde a tensão de cisalhamento atinge o valor máximo, e se propaga ao longo da viga (AUTENGRUBER et al, 2021). A ruptura causada pela tensão de cisalhamento é caracterizada por um deslizamento das fibras, quando ocorre na madeira, e é considerada uma ruptura frágil (DIETSCH; KREUZINGER, 2020). A separação das fibras por cisalhamento se inicia na extremidade da viga e se estende até o meio do vão. As vigas B6 e B9 apresentaram este modo de ruptura, conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 17 – Modos de ruptura das vigas coladas com MUF: B3 – por tração; B6 – por cisalhamento; B9 – por cisalhamento; B12 – por tração.



Fonte: o autor.

Figura 18 – Vigas coladas com MUF após a ruptura.



Fonte: o autor.

Deve-se observar que os modos de rupturas são influenciados por vários fatores, como madeira, defeitos, situação de carregamento, formato da viga e qualidade da linha de cola para membros colados (FRANKE; FRANKE; HARTE, 2015).

4 CONCLUSÕES

A avaliação experimental das vigas em MLC produzidas de eucalipto mostrou a ocorrência de um comportamento linear, com predominância de ruptura frágil por tração, sem nenhuma fratura visível antes de atingir a capacidade de carga.

A análise das tensões das vigas ensaiadas experimentalmente permite afirmar que as tensões teóricas determinadas pelo modelo analítico apresentaram uma aproximação considerável com os resultados experimentais, confirmando a validade das hipóteses adotadas. Portanto, o modelo teórico da seção transformada mostrou-se aplicável para vigas de MLC, pois foi possível obter uma aproximação considerável entre as tensões obtidas pelo método analítico e o numérico.

Os modelos numéricos de vigas MLC propostos foram eficientes, mesmo considerando a madeira um material isotrópico. Logo, a verificação mostrou uma concordância aceitável entre os resultados numéricos e os experimentais, além da análise teórica. Conclui-se que a modelagem numérica embasada no método dos elementos finitos fornece resultados satisfatórios que permitem simular o ensaio experimental e coadunam com o modelo teórico.

Portanto, as simulações numéricas são aplicáveis à prática e podem ser usadas como uma ferramenta de projeto eficaz para construções em MLC, utilizando *softwares* de elementos finitos disponíveis no mercado. O modelo utilizado pode ser aprimorado com a consideração de outras características como a não-linearidade (região de compressão) que caracteriza a plastificação da madeira. É possível considerar ainda, defeitos presentes na madeira e mecanismos do adesivo.

5 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198-22**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Philadelphia, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-143**: Standard test methods for small clear specimens of timber, Philadelphia, 2022.

AUTENGRUBER, M.; LUKACEVIC, M.; GRÖSTLINGER, C.; FÜSSL, J. Finite-element-based prediction of moisture-induced crack patterns for cross sections of solid wood and glued laminated timber exposed to a realistic climate condition. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121775, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121775>

BAÑO, V; ARRIAGA, F.; SOILÁN, A.; GUAITA, M. Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation. **Biosystems engineering**, v. 109, n. 4, p. 241-249, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.05.008>

BLANK, L.; FINK, G.; JOCKWER, R.; FRANGI, A. Quasi-brittle fracture and size effect of glued laminated timber beams. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 5, p. 667-681, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1156-0>

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and composites**. Malabar, Fla.: Krieger, 1982. 712 p.

CAMÚ, C. T. **Variation of mechanical properties in oak boards and its effect on glued laminated timber**: Application to a stochastic finite element glulam strength model. Cuvillier Verlag, 2022. Disponível em: <https://books.google.com.br> Acesso em: 20 dez. 2022.

CEPELKA, M.; MALO, K. A. Moment resisting on-site splice of large glulam elements by use of mechanically coupled long threaded rods. **Engineering Structures**, v. 163, p. 347-357, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.071>

DIAS, A.; FIORELLI, J.; MOLINA, J. C. Numerical analysis of glulam beams without and with GFRP reinforcement. In: 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE SCIENCE AND TECHNOLOGY. ICCST/10. 2015.

DIETSCH, P.; KREUZINGER, H. Dynamic effects in reinforced beams at brittle failure evaluated for timber members. **Engineering Structures**, v. 209, p. 110018, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110018>

DONADON, B.; MASCIA, N. T.; VILELA, R.; TRAUTWEIN, L. M. Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, v. 202, p. 109818, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109818>

FINK, G.; FRANGI, A.; KOHLER, J. Probabilistic approach for modelling the load-bearing capacity of glued laminated timber. **Engineering Structures**, v. 100, p. 751-762, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.015>

FRANKE, S.; FRANKE, B.; HARTE, A. M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams—State of the art. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 2-13, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021>

FRESE, M. An analytical validation of numerically determined load configuration factors. In: PROCEEDINGS OF THE WORLD CONFERENCE ON TIMBER

ENGINEERING (WCTE 2016), August 22-25, 2016, Vienna, Austria. Ed.: J. Eberhardsteiner. 2016.

GAO, S.; XU, M.; GUO, N.; ZHANG, Y. Mechanical properties of glued-laminated timber with different assembly patterns. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9495705>

GLIŠOVIĆ, I.; STEVANOVIĆ, B.; TODOROVIĆ, M. Flexural reinforcement of glulam beams with CFRP plates. **Materials and Structures**, v. 49, n. 7, p. 2841-2855, 2016. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0690-7>

GUINDOS, P.; POLOCOSER, T. Numerical calculations of the influence of the slope of grain on the effect of knots. **Europe Journal Wood and Wood Products**, v. 73, p. 271-273, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0876-7>

INTERNATIONAL ORGANIZATIONS FOR STANDARDIZATION. **ISO/FDIS 13910:2013**: Structural timber-characteristic values of strength graded timber-sampling full-size testing and evaluation, Switzerland, 2013.

JIANG, Y.; SUN, Q. Experimental and numerical studies on repaired wooden beam of traditional buildings in Huizhou Region, China. **Buildings**, v. 12, n. 7, p. 1025, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12071025>

NOGUEIRA, R. S.; ICIMOTO, F. H.; JUNIOR, C. C.; LAHR, F. Experimental study on full-scale glulam beams manufactured with *Eucalyptus urograndis*. **Maderas, Ciencia yTecnologia**, v. 25, 2023. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100405>

PEIXOTO, L. S.; SORIANO, J.; PELLIS, B. P. Tensões de flexão em vigas de madeira lamelada colada armada avaliadas por modelagem computacional. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 4, 2019, Montevidéu, **Anais [...]**. Montevidéu: Universidad de la República, 2019. p. 1-10. Disponível em: http://clem2019.uy/admin/files/clem2019/upload/files/F2-4619970-CLEM_2019_Resumo_Completo.pdf. Acesso em: 03 dez. 2022.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: junho 2022.

RESCALVO, F. J.; TIMBOLMAS, C.; BRAVO, R.; GALLEGGO, A. Experimental and numerical analysis of mixed I-214 poplar/*pinus sylvestris* laminated timber subjected to bending loadings. **Materials**, v. 13, n. 14, p. 3134, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13143134>

SAAD, K.; LENGYEL, A. Strengthening timber structural members with CFRP and GFRP: A state-of-the-art review. **Polymers**, v. 14, n. 12, p. 2381, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14122381>

SARNAGHI, A. K.; VAN DE KUILEN, J. W. G. An advanced virtual grading method for wood based on surface information of knots. **Wood Science and Technology**, v. 53, n. 3, p. 535-557, 2019.

SCIOMENTA, M.; SPERA, L.; PEDITTO, A.; CIUFFETELLI, E.; SAVINI, F.; BEDON, C.; FRAGIACOMO, M. Mechanical characterization of homogeneous and hybrid beech-Corsican pine glue-laminated timber beams. **Engineering Structures**, v. 264, p. 114450, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114450>

SHAKIMON, M. N.; ABD MALEK, N. J., HASSAN, R., AHMAD, Z. The finite element modelling of glulam tropical timber beam in bending. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 5-5, 2016. <http://dx.doi.org/10.11113/jt.v78.8579>

TANKUT, N.; TANKUT, A. N.; ZOR, M. Finite element analysis of wood materials. **Drvna industrija**, v. 65, n. 2, p. 159-171, 2014. <https://doi.org/10.5552/drind.2014.1254>

TAPIA, C.; AICHER, S. Survival analysis of tensile strength variation and simulated length–Size effect along oak boards. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 148, n. 1, p. 04021130, 2022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002006)

TSALKATIDIS, T. Numerical simulation and analytical study of glulam timber beams. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 3, n. 2, p. 129, 2014. <https://doi.org/10.14419/ijet.v3i2.2140>

UZEL, M.; TOGAY, A.; ANIL, Ö.; SÖĞÜTLÜ, C. Experimental investigation of flexural behavior of glulam beams reinforced with different bonding surface materials. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 149-163, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.033>

VIDA, C.; LUKACEVIC, M.; EBERHARDSTEINER, J.; FÜSSL, J. Modeling approach to estimate the bending strength and failure mechanisms of glued laminated timber beams. **Engineering Structures**, v. 255, p. 113862, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113862>

VIDA, C.; LUKACEVIC, M.; HOCHREINER, G.; FÜSSL, J. Size effect on bending strength of glued laminated timber predicted by a numerical simulation concept including discrete cracking. **Materials & Design**, p. 111550, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111550>

VILELA, R.; MASCIA, N. T.; DONADON, B. F. Avaliação numérica e experimental de vigas de madeira lamelada colada reforçada com fibras vectran. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE ESTRUCTURAS DE MADERAS, 4, 2019, Montevidéo, **Anais [...]**. Montevidéo: Universidad de la República, 2019. p. 1-13. Disponível em: http://www.clem2019.uy/admin/files/clem2019/upload/files/F2-4601313-CLEM_2019.pdf. Acesso em: 28 abr. 2020.

YANG, R.; HONG, C. ZHANG, X.; YUAN, Q.; SUN, Y. Experimental research on structural behaviors of glulam I-beam with a special-shaped section. **Journal of**

Renewable Materials, v. 8, n. 2, p. 113, 2020.
<https://doi.org/10.32604/jrm.2020.08190>

6 CONCLUSÕES GERAIS

A madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* pode ser empregada na fabricação de elementos de MLC. O emprego de ensaios não destrutivos para a caracterização mecânica das lamelas garante a utilização racional da madeira, pois permite a implementação do balanceamento, ou seja, a disposição das lamelas de maior resistência nas zonas de maiores solicitações e as lamelas de qualidade inferior nas zonas menos solicitadas.

Os adesivos PUR, RF e MUF podem ser empregados na fabricação de vigas de MLC. De forma geral, o RF apresentou características melhores na colagem, quando se analisa a resistência ao cisalhamento, a falha na madeira e a delaminação. Além disso, o adesivo RF apresentou penetração eficiente na estrutura da madeira e maior espessura de linha de cola. Sendo este adesivo indicado para uso estrutural em ambientes úmidos. O adesivo de PUR, derivado do óleo da mamona, é uma alternativa viável para substituir adesivos como RF e MUF, pois é um material biodegradável e procedente de matéria-prima renovável.

A avaliação experimental das vigas em MLC produzidas de eucalipto por meio do ensaio de flexão a quatro pontos apresentou comportamento linear, com predominância de ruptura frágil por tração. A comparação dos resultados experimentais com os teóricos determinadas pelo modelo analítico apresentaram uma aproximação considerável com os resultados experimentais, confirmando a validade das hipóteses adotadas.

O modelo numérico adotado para as vigas de MLC foi eficiente, pois apresentou uma concordância entre os resultados numéricos e os experimentais. Conclui-se que a modelagem numérica embasada no método dos elementos finitos fornece resultados satisfatórios que permitem simular o ensaio experimental e coadunam com o modelo teórico.

Portanto, as simulações numéricas são aplicáveis à prática e podem ser usadas como uma ferramenta de projeto eficaz para construções em MLC, com uso de *softwares* de elementos finitos disponíveis no mercado. Além disso, modelos numéricos podem ser aprimorados com a consideração de outras características como a não-linearidade (região de compressão) que caracteriza a plastificação da madeira. É possível considerar ainda, defeitos presentes na madeira e mecanismos do adesivo.

Para trabalhos futuros, sugere-se avaliar experimentalmente as vigas de MLC quando submetidas ao intemperismo e ao ataque de organismos xilófagos. Propõe-se, ainda, a avaliação experimental e numérica de vigas de MLC produzidas com madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* com emprego de *finger-joint*.