

KARINA APARECIDA DE OLIVEIRA

Avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC produzidos com diferentes combinações espécie-adesivo e diferentes acabamentos superficiais para as lamelas

Karina Aparecida de Oliveira

Avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC produzidos com diferentes combinações espécie-adesivo e diferentes acabamentos superficiais para as lamelas

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Ventrone

Guaratinguetá - SP
2023

O48a

Oliveira, Karina Aparecida de
Avaliação da qualidade de colagem de elementos de
MLC produzidos com diferentes combinações
espécie-adesivo e diferentes acabamentos superficiais para
as lamelas / Karina Aparecida de Oliveira - Guaratinguetá,
2023.

142 f : il.

Bibliografia: f. 125-142

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Ventorim

1. Resistência ao cisalhamento. 2. Lâminas de madeira.
3. Indústria madeireira. 4. Vigas de madeira. I. Título.

CDU 674(043)

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A tese oferece contribuições significativas tanto no âmbito científico quanto prático ao preencher lacunas identificadas na literatura relacionadas à influência de diversos fatores na qualidade de colagem de elementos de MLC (Madeira Laminada Colada). Estes fatores incluem o tipo de adesivo utilizado e o acabamento superficial das lamelas, e seu impacto na resistência e rigidez desses elementos de MLC fabricados com diferentes espécies de madeira de reflorestamentos recentemente introduzidas no Brasil. Portanto, a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento científico e para o setor industrial ao abordar questões cruciais relacionadas à qualidade da colagem e desempenho dos elementos de MLC em um contexto de uso de madeiras de reflorestamento promissoras no Brasil, e que possuem potencial de atender à crescente demanda por produtos de madeira e oferecer alternativas economicamente viáveis e de rápido crescimento para o mercado

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The thesis offers significant contributions both in the scientific and practical domains by addressing identified gaps in the literature regarding the influence of various factors on the adhesive quality of Glued Laminated Timber (Glulam) elements. These factors encompass the type of adhesive used and the surface finish of the lamellae, along with their impact on the strength and stiffness of these Glulam elements manufactured using different species of wood from recent reforestation efforts in Brazil. Therefore, the research contributes to the advancement of scientific knowledge and the industrial sector by addressing crucial issues related to adhesive quality and the performance of Glulam elements in the context of using promising reforestation wood species in Brazil. These species have the potential to meet the growing demand for wood products and offer economically viable and rapidly growing alternatives to the market.

KARINA APARECIDA DE OLIVEIRA

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTORA EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Documento assinado digitalmente
 **MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES**
Data: 13/09/2023 10:30:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **JULIO CESAR MOLINA**
Data: 01/09/2023 18:09:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
Orientador – USP
Participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIS CHRISTOFORO**
Data: 04/09/2023 13:48:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ANDRE LUIS CHRISTOFORO
UFSCar
Participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR**
Data: 04/09/2023 14:01:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR
USP
Participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 **SANDRO FABIO CESAR**
Data: 01/09/2023 22:55:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. SANDRO FÁBIO CESAR
Universidade Federal da Bahia
Participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 **CESAR AUGUSTO GALVAO DE MORAIS**
Data: 04/09/2023 12:57:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO G. DE MORAIS
UNESP
Participou por videoconferência

Setembro de 2023

DADOS CURRICULARES

KARINA APARECIDA DE OLIVEIRA

NASCIMENTO	31.01.1989 – Itapeva / SP
FILIAÇÃO	Marlos Almeida de Oliveira Silvana de Jesus Barros Oliveira
2005/2006	Curso Técnico Técnico em informática – ETEC Dr. Demétrio Azevedo Junior
2007/2013	Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira Engenharia Industrial Madeireira – UNESP/Itapeva.
2016/2018	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP/Guaratinguetá
2019/2023	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP/Guaratinguetá

Dedico este trabalho à Deus e à minha família, responsáveis
por me dar a força necessária para seguir em frente e
alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de vida e sabedoria, por sempre me guiar e iluminar meu caminho.

Aos meus pais, Silvana e Marlos, que sempre incentivaram meus estudos. À minha irmã Carolina por me estressar e apoiar durante todo esse caminho, à minha sobrinha Maria Eduarda por deixar os meus dias mais leves e cheios de cor, e ao meu anjinho José Luiz Gustavo (*in memoriam*).

Ao meu orientador Prof. Dr. Julio Cesar Molina pela paciência, força de vontade, dedicação, orientação e amizade durante esse longo período.

Aos meus amigos de pós-graduação Natália Bianchi, Vitor Neves e João Vitor, pelo auxílio durante a realização desse trabalho, seja durante os ensaios, discussões referentes ao tema, ou nas longas conversas aleatórias enquanto tomávamos café.

Aos técnicos de laboratório que colaboraram para a realização deste trabalho, em especial aos técnicos e amigos Juliano Brito (*in memoriam*) e Thiago Sorocaba.

Aos professores Prof.^a Dr.^a Cristiane e Prof. Dr. Alexandre, por toda a ajuda em momentos de crises durante o desenvolvimento da pesquisa, e pela amizade em toda a minha caminhada acadêmica, da graduação ao doutorado.

À empresa Vale do Cedro pela doação das madeiras utilizadas para a realização do presente trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), código de financiamento 001, pela concessão de bolsa de doutorado, a qual me proporcionou meios para execução deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, eles são a abertura para achar as que estão certas”.

Carl Sagan

RESUMO

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é um produto estrutural engenheirado utilizado na construção civil no Brasil e no mundo. Esse produto requer um alto controle de qualidade na sua produção, além da escolha correta da combinação espécie/adesivo. Nesta pesquisa realizou-se o estudo de diferentes combinações espécie-adesivo-acabamento para elementos de MLC produzidos com madeiras de reflorestamento (Cedro australiano e Cedro indiano), adesivos estruturais (poliuretano bicomponente e resorcinol-formaldeído) e diferentes níveis de acabamentos da superfície das lamelas (aplainamento e lixamentos com gramatura 80, 120 e 220) com o objetivo de avaliar a influência da rugosidade superficial das lamelas na resposta de ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola. Para tanto, a avaliação da qualidade de colagem dos elementos de MLC produzidos foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7190-6 (2022) que tem como base a EN 14080 (2013). Foi realizada a caracterização físico-mecânica das madeiras e determinada a rigidez (MOE) e a resistência (MOR) à flexão das vigas produzidas. Todas as combinações espécie-adesivo-acabamento apresentaram porcentagem de delaminação abaixo do limite de 6% permitido para folhosas com predominância de maior porcentagem de ruptura na madeira, indicando boa qualidade de colagem. O acabamento superficial com lixamento das lamelas não foi considerado um fator de influência nos resultados segundo a ANOVA. Para ambas as madeiras, os melhores resultados de rigidez (MOE) e de resistência à flexão (MOR) foram obtidos para os elementos com acabamento superficial gerado por aplainamento somente, sendo que para o Cedro australiano foram obtidos os valores de MOE e MOR iguais a 7315 MPa e 49,78 MPa, respectivamente para o adesivo poliuretano, e de 7955 MPa e 53,43 MPa para o adesivo resorcinol-formaldeído. Para o Cedro indiano os valores de MOE e MOR obtidos foram 7951 MPa e 60,44 MPa, respectivamente, para o adesivo poliuretano, e 7959 MPa e 59,18 MPa para o adesivo resorcinol-formaldeído. Para a rigidez e resistência à flexão, a ANOVA não considerou significativa a interação dos fatores tipo de adesivo e acabamento para nenhuma das combinações estudadas, sendo que para o MOE E MOR apenas o tipo de acabamento superficial das lamelas influenciou nos resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: resistência ao cisalhamento; acabamento; delaminação; rugosidade superficial; qualidade de colagem.

ABSTRACT

Glued Laminated Timber (Glulam) is an engineered structural product used in construction worldwide, including in Brazil. This product requires high-quality control in its production, as well as the correct choice of species/adhesive combination. In this research, different species-adhesive-finish combinations were studied for Glulam elements made from reforestation woods (Australian cedar and Indian cedar), structural adhesives (two-component polyurethane and resorcinol-formaldehyde), and different levels of surface finishes (with thicknessing plane and with 80, 120 and 220 grit sandpaper) to evaluate the influence of surface roughness on delamination tests and shear strength of glue lines. For this purpose, the evaluation of the bonding quality of the produced Glulam elements was performed according to ABNT NBR 7190-6 (2022), which is based on EN 14080 (2013). The physical and mechanical characterization of the woods was conducted, and the modulus of elasticity (MOE) and bending strength (MOR) of the produced beams were determined. All species-adhesive-finish combinations exhibited delamination percentages below the 6% limit allowed for hardwoods, with a predominance of wood failure, indicating good bonding quality. According to the ANOVA analysis, the surface finish with the sanding of the lamellas was not considered an influencing factor in the results. For both types of wood, the best stiffness (MOE) and flexural strength (MOR) were obtained for elements with surface finish generated only by thicknessing plane. For Australian cedar, the values of MOE and MOR were found to be 7315 MPa and 49.78 MPa, respectively, for the combination AP, 7955 MPa, and 53.43 MPa for the combination AF. For Indian Cedar, the obtained values for MOE and MOR were 7951 MPa and 60.44 MPa, respectively, for the combination IP, and 7959 MPa, and 59.18 MPa for the combination IF. For stiffness and flexural strength, the ANOVA did not consider the interaction between adhesive type and surface finish significant for any of the studied combinations. Only the type of surface finish of the lamellas influenced the results obtained for MOE and MOR. In the flexural tests of the Glulam beams produced with both cedar kinds of wood, there was a predominance of tensile failure in the tension region (lower lamella).

KEYWORDS: shear strength of glue lines; surface finish; delamination; surface roughness; glue quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de confecção de um elemento de MLC.	23
Figura 2 – Construções utilizando elementos estruturais de MLC.....	24
Figura 3 – Tipos de emenda em elementos de MLC.....	25
Figura 4 – Cadeia produtiva da madeira no Brasil em 2021.	27
Figura 5 – Madeira de <i>Eucalypto grandis</i>	29
Figura 6 – Madeira de <i>Pinus elliottii</i>	30
Figura 7 – Madeira de Cedro australiano.	31
Figura 8 – Madeira de Cedro indiano.....	33
Figura 9 – Comprimentos considerados para avaliação da rugosidade.....	37
Figura 10 – Representação do parâmetro R_a	38
Figura 11 – Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento da linha de cola.....	53
Figura 12 – Dispositivo para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.	54
Figura 13 – Corpo de prova para o ensaio de delaminação.....	55
Figura 14 – Forma de disposição dos corpos de prova de MLC na estufa.....	56
Figura 15 – Seção transversal a ser considerada na avaliação da delaminação.	56
Figura 16 – Publicações de pesquisadores brasileiros com o termo “ <i>glulam</i> ”.....	61
Figura 17 – Publicações internacionais com o termo “ <i>glulam</i> ”.	62
Figura 18 – Quantidade de publicações com os termos “ <i>glulam</i> ”, “ <i>Pinus</i> ” e “ <i>Eucalyptus</i> ”...62	
Figura 19 – Processos de: (a) Aplainamento; (b) Seccionamento para obtenção das lamelas. 67	
Figura 20 – Controle de secagem das lamelas: (a) Entabicação; (b) Acompanhamento da secagem das lamelas.	68
Figura 21 – Corpo de prova para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.	70
Figura 22 – Corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.	71
Figura 23 – Ensaio de caracterização mecânica dos corpos de prova.	72
Figura 24 – Gabarito confeccionado em acrílico para auxiliar na medição dos nós.	73
Figura 25 – Seção transversal das vigas de MLC para ensaios de delaminação e cisalhamento das linhas de cola.	74
Figura 26 – Seção transversal das vigas de MLC para ensaios de resistência à flexão.....	75
Figura 27 – Aplainamento das lamelas em plaina desgrossadeira.....	75
Figura 28 – Medição da rugosidade superficial das superfícies das lamelas.	76
Figura 29 – Determinação da viscosidade com Copo Ford.....	77
Figura 30 – Aplicação do adesivo nas lamelas de madeira.	78

Figura 31 – Prensagem dos elementos de MLC: (a) Prensa industrial de chão; (b) Aplicação de pressão de colagem utilizando torquímetro.	79
Figura 32 – Prensagem das vigas em prensa industrial.	80
Figura 33 – Padronização dos elementos de MLC produzidos.	81
Figura 34 – Corpos de prova para delaminação e cisalhamento das linhas de cola.	81
Figura 35 – Corte das peças para preparação das amostras de microscopia óptica.....	82
Figura 36 – Preparação das amostras: (a) Saturação em câmara de vácuo; (b) Cozimento.	83
Figura 37 – Preparação das lâminas: (a) Corte das amostras no micrótomo; (b) Lâminas para microscopia prontas.	83
Figura 38 – Análise das amostras no microscópio de luz transmitida.....	84
Figura 39 – Ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola.	85
Figura 40 – Esquema utilizado para quantificação da porcentagem de ruptura.	86
Figura 41 – (a) Medição e (b) pesagem dos corpos de prova de delaminação.....	87
Figura 42 – Autoclave utilizada para o ensaio de delaminação da linha de cola.	87
Figura 43 – Corpos de prova no interior da autoclave para ensaio de delaminação.	88
Figura 44 – Corpos de prova após ciclos de pressão e vácuo em autoclave: (a) Corpos de prova saturados; (b) Corpos de prova na na câmara climatizadora.....	89
Figura 45 – Ensaio de flexão dos elementos de MLC.....	90
Figura 46 – Microscopia da superfície das lamelas de Cedro australiano (escala: 500 μm)....	97
Figura 47 – Microscopia da superfície das lamelas de Cedro indiano (escala: 500 μm).	97
Figura 48 – Interface madeira-adesivo dos elementos de MLC de Cedro australiano colado com poliuretano AG101 (Escala 500 μm).	100
Figura 49 – Interface madeira-adesivo dos elementos de MLC de Cedro australiano colado com Cascophen RS-216-M (Escala 500 μm).....	101
Figura 50 – Interface madeira-adesivo dos elementos de MLC de Cedro indiano colado com poliuretano AG101 (Escala 500 μm).	102
Figura 51 – Interface madeira-adesivo dos elementos de MLC de Cedro indiano colado com Cascophen RS-216-M (Escala 500 μm).....	102
Figura 52 – (a) Gráfico de Pareto e (b) Gráfico de interação da resistência ao cisalhamento das linhas de cola dos elementos de MLC de Cedro australiano.	105
Figura 53 – (a) Gráfico de Pareto e (b) Gráfico de interação da resistência ao cisalhamento das linhas de cola dos elementos de MLC de Cedro indiano.	106
Figura 54 – (a) Gráfico de Pareto e (b) Gráfico de interação da porcentagem de ruptura na madeira dos elementos de MLC de Cedro australiano.....	108

Figura 55 – (a) Gráfico de Pareto e (b) Gráfico de interação da porcentagem de ruptura na madeira dos elementos de MLC de Cedro indiano.	109
Figura 56 – Corpos de prova de Cedro australiano: (a) Sem sofrer delaminação, e (b) delaminação dentro do limite máximo permitido de 6%.	110
Figura 57 – Corpos de prova de Cedro indiano: (a) Sem sofrer delaminação, e (b) delaminação dentro do limite máximo permitido de 6%.	112
Figura 58 – Modos de ruptura dos MLC de Cedro australiano com adesivo poliuretano.....	117
Figura 59 – Modos de ruptura dos MLC de Cedro australiano com adesivo resorcinol-formaldeído.	118
Figura 60 – Modos de ruptura dos MLC de Cedro indiano com adesivo poliuretano.	119
Figura 61 – Modos de ruptura dos MLC de Cedro indiano com adesivo resorcinol-formaldeído.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de serviço dos elementos estruturais de MLC.	47
Tabela 2 – Porcentagens máximas permitidas para delaminação da linha de cola de acordo com o número de ciclos de vácuo-pressão realizados.....	48
Tabela 3 – Critérios de classificação visual para coníferas.	50
Tabela 4 – Critérios de classificação visual para folhosas.	51
Tabela 5 – Critérios de classificação mecânica para coníferas.	52
Tabela 6 – Critérios de classificação mecânica para folhosas.....	52
Tabela 7 – Resumo dos limites de delaminação para cada ambiente de exposição.	53
Tabela 8 – Resumo dos métodos de delaminação.	58
Tabela 9 – Identificação das combinações madeira-adesivo-acabamento utilizadas.	93
Tabela 10 – Resultados da caracterização física do Cedro australiano e indiano.	94
Tabela 11 – Resultados da caracterização mecânica do Cedro australiano e indiano, U = 12%.	95
Tabela 12 – Valores de rugosidade superficial média (Ra) para as lamelas de madeira.....	96
Tabela 13 – Resultados da espessura das linhas de cola das vigas de Cedro australiano.	98
Tabela 14 – Resultados da espessura das linhas de cola das vigas de Cedro indiano.....	99
Tabela 15 – Resistências ao cisalhamento das linhas de cola para os elementos de MLC fabricados com Cedro australiano.....	103
Tabela 16 – Resistências ao cisalhamento das linhas de cola para os elementos de MLC fabricados com Cedro indiano.....	104
Tabela 17 – Modos de ruptura nas regiões de colagem dos elementos de Cedro australiano.	107
Tabela 18 – Modos de ruptura nas regiões de colagem dos elementos de Cedro indiano.	107
Tabela 19 – Resultados médios de delaminação dos elementos de Cedro australiano.	109
Tabela 20 – Resultados médios de delaminação dos elementos de Cedro indiano.....	111
Tabela 21 – Modos de ruptura nas regiões de colagem e porcentagem de delaminação dos elementos de Cedro australiano.	113
Tabela 22 – Modos de ruptura nas regiões de colagem e porcentagem de delaminação dos elementos de Cedro indiano.....	113
Tabela 23 – Rigidez e resistência à flexão dos elementos de MLC fabricados com Cedro australiano.	114

Tabela 24 – Resultados do teste de Tukey do fator “tipo de adesivo” dos elementos de MLC fabricados com Cedro australiano.....	115
Tabela 25 – Rigidez e resistência à flexão dos elementos de MLC fabricados com Cedro indiano.....	116
Tabela 26 – Resultados do teste de Tukey do fator “tipo de adesivo” dos elementos de MLC fabricados com Cedro indiano.	117

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	GERAL.....	20
2.2	ESPECÍFICOS	20
2.3	JUSTIFICATIVA.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1	MADEIRA LAMELADA COLADA	23
3.2	ESPÉCIES DE MADEIRAS UTILIZADAS PARA MLC.....	26
3.2.1	Eucalipto grandis (<i>Eucalyptus grandis</i>).....	28
3.2.2	Pinus elliottii (<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>).....	29
3.2.3	Cedro australiano (<i>Toona ciliata</i>)	31
3.2.4	Cedro indiano (<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>).....	32
3.3	FATORES QUE AFETAM A COLAGEM.....	34
3.3.1	Densidade da madeira.....	34
3.3.2	Porosidade e permeabilidade da madeira	34
3.3.3	Teor de umidade da madeira	35
3.3.4	Teor de extrativos da madeira	36
3.3.5	Rugosidade da superfície da madeira.....	36
3.3.6	Molhabilidade do adesivo	38
3.3.7	Viscosidade do adesivo.....	38
3.3.8	pH do adesivo.....	39
3.3.9	Pressão e tempo de colagem	39
3.3.10	Temperatura de colagem	40
3.4	ADESIVOS UTILIZADOS PARA MLC	40
3.4.1	Adesivo à base de Resorcinol-Formaldeído	41
3.4.2	Adesivo à base de Poliuretano	42
3.5	NORMAS INTERNACIONAIS DE CONTROLE DA QUALIDADE DA MLC....	43
3.5.1	Normas americanas: ASTM D2559, D4688 e D198.....	44
3.5.2	Normas canadenses: CSA 112.9 e CSA 112.10	45
3.5.3	Normas europeias: EN 14080 e EN 408.....	46
3.6	NORMA BRASILEIRA DE CONTROLE DA QUALIDADE DA MLC	48
3.6.1	Norma ABNT NBR 7190-2	50
3.6.2	Norma ABNT NBR 7190-6	52
3.7	ESTUDOS COM MLC REALIZADOS NO BRASIL	58

3.8	ESTUDOS COM FATORES QUE AFETAM A COLAGEM.....	63
3.9	CONCLUSÕES GERAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	65
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
4.1	CORPOS DE PROVA DE CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS.....	67
4.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	68
4.2.1	Caracterização física das espécies de madeiras	69
4.2.2	Caracterização mecânica das espécies de madeiras	70
4.3	CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS LAMELAS	73
4.4	PREPARAÇÃO DAS LAMELAS.....	74
4.4.1	Separação das lamelas.....	74
4.4.2	Acabamento das superfícies das lamelas.....	75
4.4.3	Medição da rugosidade das superfícies	76
4.5	FABRICAÇÃO DAS VIGAS DE MLC	77
4.5.1	Determinação da viscosidade dos adesivos	77
4.5.2	Colagem do MLC	78
4.5.3	Confecção dos corpos de prova para os testes de qualidade de colagem	81
4.6	ENSAIO DE MICROSCOPIA ÓPTICA	82
4.7	ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA ..	85
4.8	ENSAIOS DE DELAMINAÇÃO DAS LINHAS DE COLA	86
4.9	ENSAIO DE FLEXÃO DA VIGA	89
4.10	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	91
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ESPÉCIES.....	94
5.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ESPÉCIES	95
5.3	RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES DAS LAMELAS	96
5.4	ANÁLISE DA INTERFACE MADEIRA-ADESIVO.....	98
5.5	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA	103
5.5.1	Análise dos modos de ruptura nas regiões de colagem	106
5.6	DELAMINAÇÃO DAS LINHAS DE COLA	109
5.7	COMPARATIVO ENTRE MODO DE RUPTURA E DELAMINAÇÃO	112
5.8	RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS.....	114
5.8.1	Análise dos modos de ruptura na flexão	117
6	CONCLUSÃO	122
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a indústria da construção civil é uma das mais importantes para o desenvolvimento econômico e social do país, porém é uma das grandes geradoras de impactos ambientais pela exploração e consumo excessivo dos recursos naturais (LINTZ *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2012).

Dentro deste contexto, a madeira é um material de extrema importância para a indústria da construção civil, pois consiste em uma matéria prima renovável, portanto, de menor impacto ambiental, com baixo consumo energético para sua produção, e que possui alta relação resistência-peso, sendo concorrente direta dos materiais mais utilizados na construção, como o aço e o concreto.

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é uma opção para a confecção de estruturas de madeira, e trata-se de um produto engenheirado obtido pela associação de lamelas coladas de madeira com adesivos estruturais sintéticos (SEGUNDINHO *et al.*, 2013).

Esse tipo de produto pode ser utilizado na composição de estruturas de grandes vãos, pontes, edifícios, entre outras estruturas, pois tem a vantagem de permitir elementos com grandes dimensões e diferentes formas, além de alta resistência às solicitações mecânicas, que são obtidas pela escolha correta das espécies de madeira associada ao processo de classificação das lamelas componentes das peças de MLC (ZANGIÁCOMO e ROCCO LAHR, 2007).

A MLC possui um mercado que é praticamente inexistente no Brasil, apesar da grande necessidade de madeira com propriedades uniformes e características técnicas, econômicas e estéticas necessárias à construção civil, são poucas as indústrias que produzem elementos estruturais de MLC, resultando em um alto custo para esse produto (GARBE *et al.*, 2019).

Por ser um produto engenheirado relativamente novo no Brasil, muitos estudos ainda devem ser realizados, seja para definir os parâmetros de produção do produto, como também para avaliar sua qualidade final em condições de serviço.

Para a confecção dos elementos de MLC, as indústrias usam como matéria prima lamelas provenientes de espécies de coníferas e dicotiledôneas de reflorestamento, sendo as espécies mais comuns no Brasil o Pinus e o Eucalipto. Porém, o país busca introduzir em seu território outras espécies para reflorestamento, aumentando as possibilidades do mercado com alternativas rentáveis e de rápido crescimento, como é o caso da madeira das espécies Cedro australiano e Cedro indiano.

Na região de Itapeva, estado de São Paulo, a empresa Vale do Cedro possui uma área total de mais de 2.500 hectares de floresta plantada das espécies Pinus e Eucalipto, e das espécies Cedro indiano e Cedro australiano. Como citado anteriormente, o Pinus e o Eucalipto são as principais espécies utilizadas pelas indústrias para confecção da MLC, mas sobre os cedros ainda não existem estudos quanto ao seu desempenho para essa finalidade, como também existem poucos resultados avaliando as suas propriedades físicas e mecânicas.

Além da espécie de madeira utilizada na confecção do elemento MLC, outros fatores devem ser levados em consideração, dentre eles: a densidade e porosidade da madeira, a rugosidade superficial das lamelas, as espessuras e posições das lamelas na seção transversal do elemento, o uso ou não de tratamento preservante, o tipo de adesivo, a pressão de colagem, entre outros fatores que podem afetar significativamente a qualidade e a resistência mecânica final do material.

De forma geral, durante a produção dos elementos é necessário que se busque maior agilidade no processo de produção, como também a redução dos custos, sempre que possível. Porém, para atingir esses objetivos, é preciso tomar decisões de forma segura e objetiva, sendo necessário realizar estudos para que todos os parâmetros envolvidos no processo de produção dos elementos de MLC sejam conhecidos, conseguindo, assim, melhorar certas propriedades de acordo com o necessário no projeto, aumentando a qualidade do material que está sendo produzido e reduzindo os custos envolvidos na produção.

Este trabalho de pesquisa tem a finalidade de avaliar a resposta da qualidade de colagem de elementos de MLC produzidos com duas diferentes espécies de madeiras de florestas plantadas, com diferentes adesivos estruturais e diferentes níveis de acabamento superficial (rugosidade) das lamelas utilizadas na confecção. Também foi avaliado o comportamento na flexão dos elementos de MLC produzidos.

A qualidade de colagem será avaliada através de ensaios de delaminação e resistência ao cisalhamento das linhas de cola, utilizando como base o método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022). Os métodos de ensaios apresentados do projeto de norma brasileira foram baseados nos procedimentos da norma europeia EN 14080 (2013) para ambientes internos.

Não foram encontrados na literatura trabalhos que relacionam diferentes níveis de lixamento das lamelas de elementos de MLC produzidos com os referidos cedros, tendo em vista a avaliação da resposta da qualidade de colagem. Portanto, a partir do desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa, buscou-se, também, contribuir com a literatura nacional sobre o assunto, que atualmente encontra-se em seu estágio inicial.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a qualidade de colagem de elementos de MLC confeccionados com diferentes espécies de madeira de reflorestamento, utilizando dois tipos de adesivos estruturais e quatro diferentes níveis de acabamentos da superfície de colagem (aplainamento e lixamentos).

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar as normas técnicas nacionais e internacionais existentes e utilizadas na determinação da qualidade de colagem de elementos de MLC;
- Caracterizar visual, física (ρ_{ap} e umidade) e mecânica (E_M , $E_{c0,m}$, $f_{c0,m}$ e $f_{v0,m}$) as espécies de madeira de reflorestamento, Cedro australiano e Cedro indiano, que irão compor os elementos de MLC;
- Avaliar a qualidade de colagem dos elementos de MLC, com base em ensaios de resistência ao cisalhamento e delaminação das linhas de cola realizados segundo a norma ABNT NBR 7190-6 (2022), baseado na normativa europeia EN 14080 (2013);
- Avaliar a influência da interação dos diferentes tipos de adesivos (poliuretamento bicomponente e resorcinol formaldeído) e acabamento da superfície (aplainamento e lixamento com lixas 80, 120 e 220) na qualidade de colagem dos elementos de MLC, por espécie;
- Avaliar a influência do nível de acabamento da superfície das lamelas na resposta da qualidade de colagem dos elementos de MLC produzidos com as diferentes combinações espécie-adesivo;
- Determinar a rigidez e a resistência à flexão dos elementos de MLC;

2.3 JUSTIFICATIVA

A demanda por materiais alternativos ambientalmente corretos tem aumentado significativamente no Brasil e no mundo. Além disso, atualmente, há uma preocupação crescente com a preservação do meio ambiente e dos recursos naturais. Nesse cenário, a madeira

se apresenta como um material de extrema importância, pois é uma matéria-prima sustentável e abundante quando se utilizam madeira reflorestamento na produção de elementos industrializados estruturais, uma vez que a madeira apresenta baixo consumo energético durante o crescimento da árvore além de uma alta capacidade estrutural, e até superior aos outros materiais, principalmente quando se considera a relação resistência/peso do material.

E, à medida que a demanda e a produção de madeira aumentam, é possível obter custos mais baixos e utilização de produtos industrializados com controle na produção resultado em maior velocidade na produção em aplicações na construção civil tornando os produtos industrializados de madeira altamente competitivos.

Os produtos industrializados de madeira representam uma classe ampla de materiais que possuem grande importância, tanto para a fabricação de móveis quanto para a construção civil. Na construção civil, a MLC (Madeira Lamelada Colada) tem ganhado popularidade na confecção de elementos lineares como as vigas, pilares e elementos curvos como os arcos, porém, o desenvolvimento do seu uso depende de avanços tecnológicos, do desenvolvimento de novos adesivos aplicados na sua fabricação, além de estudos de diferentes combinações espécie/adesivo pois diversos fatores que podem afetar a qualidade de colagem.

Portanto, são necessários estudos teóricos, numéricos e experimentais para analisar adequadamente o comportamento e a eficiência estrutural desses produtos frente as diferentes aplicações possíveis para o mercado e combinações espécie/adesivo.

No Brasil existem poucos estudos envolvendo a qualidade de colagem de elementos de MLC, uma vez que não existia um método de ensaio brasileiro indicado para tal finalidade e os pesquisadores se embasavam em recomendações internacionais para a adequada avaliação desse produto.

O método de ensaio brasileiro ABNT NBR 7190-6 foi publicado em 29/06/2022 e tem como base a norma europeia 14080 para ambientes externos e um dos primeiros resultados envolvendo essa temática para diferentes combinações espécie/adesivo são apresentados nesta tese.

Também não existem muitas pesquisas sobre elementos de MLC produzidos por diferentes madeiras de reflorestamento, como os Cedros indiano e australiano, visto que os principais estudos até o momento eram focados nas madeiras de Pinus e Eucalipto, que são as duas espécies que possuem as maiores áreas de reflorestamento no país.

Sendo assim, esse trabalho buscou avaliar a influência de dois diferentes parâmetros, acabamento superficial das lamelas e tipo de adesivo estrutural utilizado, na qualidade de

colagem de elementos de MLC produzidos com espécies de reflorestamento pouco conhecidas no Brasil. As espécies selecionadas para o trabalho são o Cedro australiano e o Cedro indiano, espécies com alta taxa de crescimento, e que encontraram no Brasil condições favoráveis ao seu crescimento, sendo consideradas promissoras para o reflorestamento, visando suprir a demanda de madeira e aumentar as possibilidades do mercado.

Além disso, a literatura sobre esse tema está em fase de desenvolvimento no Brasil e estudos dessa natureza são extremamente necessários para a indústria.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira é um material renovável que apresenta propriedades físicas e mecânicas variáveis entre espécies e, inclusive, dentro de uma mesma espécie, sendo matéria-prima indispensável em aplicações na construção civil, indústria moveleira, indústria de papel e celulose, dentre outras (DIAS e LAHR, 2002).

Apesar de se tratar de um material natural e renovável, o atual cenário de escassez de recursos naturais resultou na busca de novas alternativas para um aproveitamento mais racional desse material, com adequação às legislações ambientais, como os produtos engenheirados.

Alguns exemplos de produtos engenheirados ou industrializados de madeira, disponíveis no mercado brasileiro, são: painéis compensados, aglomerados, CLT ou MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada), MLC (Madeira Lamelada Colada), entre outros.

3.1 MADEIRA LAMELADA COLADA

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é um produto estrutural engenheirado, confeccionado a partir de lamelas (tábuas) de madeira unidas por adesivos estruturais sintéticos, que é utilizado há muitos anos em países como EUA e Canadá, Alemanha e Suíça, os quais possuem grande experiência na construção com estruturas de madeira (SEGUNDINHO *et al.*, 2013; ICIMOTO *et al.*, 2016).

Os elementos de MLC são confeccionados unindo-se duas ou mais lamelas de madeira, posicionadas de forma que suas fibras estejam paralelas entre si, por meio do uso de adesivo sintético estrutural (Figura 1) e com aplicação de pressão sobre as lamelas externas para garantir a colagem (CALIL NETO *et al.*, 2014a; CEPELKA e MALO, 2017; LUZ *et al.*, 2020).

Figura 1 – Esquema de confecção de um elemento de MLC.



Fonte: Autoria própria.

A MLC pode ser utilizada na composição de estruturas de cobertura, elementos estruturais de pontes, torres de transmissão, edifícios, entre outros, pois possui capacidade de se adaptar a diversas formas e dimensões (Figura 2), e apresenta alta resistência às solicitações mecânicas, em função de seu peso próprio relativamente baixo (ZANGIÁCOMO e ROCCO LAHR, 2007; CALIL NETO *et al.*, 2014a).

Figura 2 – Construções utilizando elementos estruturais de MLC.



(a) Estrutura de cobertura em arco



(b) Espaços urbanos

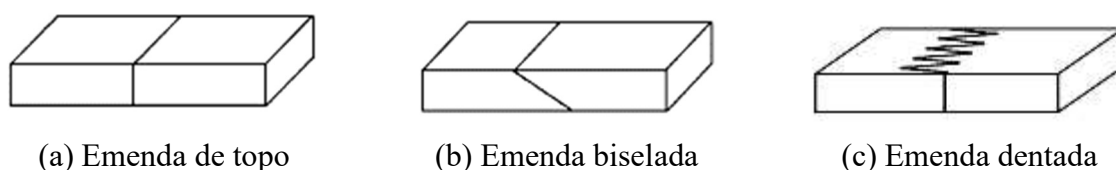


(c) Residência em MLC

Fonte: Calil Madeiras (2022).

Esses elementos estruturais podem possuir emendas longitudinais entre as lamelas, sendo estas utilizadas para obtenção de maiores comprimentos e larguras, permitindo também que o elemento obtenha formato curvo. Essas emendas podem ser dos seguintes tipos (Figura 3): emenda de topo, que possui fácil execução, mas baixa eficiência; emenda biselada, uma emenda de difícil execução e resulta em grande perda de material; ou emenda dentada do tipo *finger joint*, que possui alta eficiência de produção e resistência mais uniforme (AZAMBUJA e DIAS, 2002; FIORELLI, 2005).

Figura 3 – Tipos de emenda em elementos de MLC.



Fonte: Azambuja e Dias (2002).

O uso de elementos de MLC tem como vantagens a redução dos defeitos próprios e de secagem observados em peças de madeiras maciças, como rachaduras, empenamentos e encanoamentos, permitindo-se ainda a distribuição seletiva das lamelas, posicionando as peças de melhor qualidade nas regiões de maiores solicitações, as quais exigem maiores valores de resistência e de rigidez, (FIORELLI, 2005; MIOTTO, 2009).

Os elementos de MLC também apresentam boa resistência ao fogo em função de suas grandes seções transversais (ZANGIÁCOMO, 2003; SEGUNDINHO *et al.*, 2013).

Para a confecção de elementos de MLC, alguns fatores devem ser levados em consideração, tais como, a espécie de madeira utilizada, espessura e posição das lamelas no elemento estrutural, tratamento preservante, tipo de adesivo, rugosidade da superfície das lamelas, pressão de colagem, entre outras, os quais podem afetar significativamente a resistência mecânica da linha de cola (CALIL NETO *et al.*, 2014a).

Além desses fatores, por se tratar de um produto engenheirado, é necessário que as etapas do processo produtivo tenham um rígido controle de qualidade, utilizem mão de obra treinada e matéria-prima com desempenho compatível aos requisitos dos produtos, assegurando que as propriedades do MLC estejam de acordo com as especificações das normas vigentes (ALMEIDA *et al.*, 2014; CALIL NETO *et al.*, 2014b; ROCCO LAHR *et al.*, 2014; ROCCO LAHR *et al.*, 2015). Além disso, como desvantagem, pode-se citar o maior custo em comparação à madeira maciça e outros produtos industrializados de madeira (ZANGIÁCOMO, 2003).

A qualidade de colagem e a performance estrutural dos elementos de MLC deve ser avaliada por meio de ensaios padronizados, que possuem como função caracterizar as propriedades físicas e mecânicas das peças (FARIA *et al.*, 2019).

A *American Institute of Timber Construction* (AITC), define na normativa AITC 115 (2009), que o controle de qualidade são as ações que devem ser realizadas pelo fabricante em relação aos materiais, equipamentos, métodos, mão-de-obra e produto final, para satisfazer aos requisitos necessários de uma norma de controle de qualidade.

No Brasil, até o ano de 2021, não existia uma norma específica para controle da qualidade de elementos de MLC, e as indústrias brasileiras utilizavam recomendações especificadas pelas normas canadenses CSA 0177 (2006), CSA 112.9 (2004) e CSA 112.10 (2007), americanas AITC A190.1 (2017), ASTM D2559 (2004), ASTM D4688 (2014) e ASTM D198 (2015), e europeias EN 386 (2001), EN 14080 (2013) e EN 408 (2011).

No entanto, algumas normas estrangeiras como a norma canadense, recomendam procedimentos de ensaios bastante extensos, por considerarem ciclos de congelamento e degelo, os quais são incompatíveis para a realidade das estruturas brasileiras.

Nesse sentido, a proposição de um método de ensaio brasileiro, que atendesse a realidade da exposição ao ambiente das estruturas brasileiras de MLC e que fosse eficiente na sua aplicação, foi desenvolvida pela comissão de estudos CE 002 126 010 (Estruturas de Madeira) da ABNT durante vários anos, e aprovada em meados de 2022.

3.2 ESPÉCIES DE MADEIRAS UTILIZADAS PARA MLC

No Brasil, o setor de plantações de reflorestamento tem sido fundamental para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental do país, promovendo mudanças econômicas locais, gerando novas oportunidades de trabalho e renda para a população, e, por ser uma indústria que se preocupa com o futuro, há investimentos em pesquisas que estão alinhadas com à bioeconomia, contribuindo com a adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

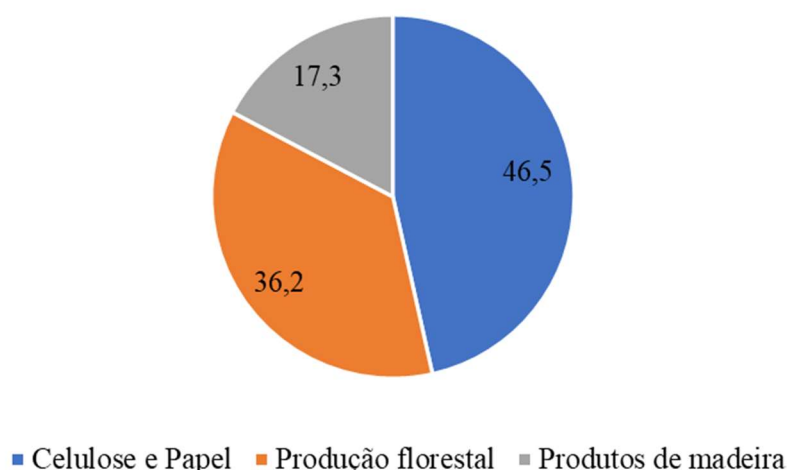
No entanto, as florestas plantadas no Brasil, correspondem a cerca de apenas 1,5% das florestas existentes no território nacional, embora desempenhem um papel importante no mercado de produtos florestais (IBÁ, 2022).

Segundo relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), a indústria florestal do Brasil cresceu 7,5% em 2021, crescimento superior ao do PIB nacional, que cresceu 4,6% em 2021 após ter retraído 3,9% em 2020 por consequência da pandemia de COVID-19. Em termos de

participação, a cadeia produtiva florestal representou 1,2% da economia brasileira, chegando a um recorde na receita bruta de R\$ 244,6 bilhões (IBÁ, 2022).

Os dados divulgados mostram que, dentro da cadeia produtiva da madeira, 46,5% correspondem à indústria de celulose e papel, 36,2% à indústria de produção florestal, e 17,3% à indústria de fabricação de produtos de madeira (Figura 4).

Figura 4 – Cadeia produtiva da madeira no Brasil em 2021.



Fonte: Adaptado de IBÁ (2022).

A área total de florestas plantadas no Brasil foi de 9,94 milhões de hectares no ano de 2021, correspondendo a um aumento de 10,45% em relação ao ano de 2019. Desse total, 7,53 milhões de hectares correspondem ao cultivo de Eucalipto (75,8%), 1,93 milhões ao cultivo de Pinus (19,4%) e 0,48 milhão ao cultivo de outras espécies (4,8%), como Seringueira, Teca, Cedro, Paricá e Acácia (IBÁ, 2022).

Os elementos de madeira lamelada colada (MLC), no Brasil, são produzidos, principalmente, com madeiras das espécies de reflorestamento dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, pois estas possuem boas características físicas e mecânicas, e são espécies de rápido crescimento em comparação com espécies nativas do Brasil.

As coníferas (*Pinus*) são as mais utilizadas na indústria pela facilidade da colagem, pois apresentam uma melhor penetração e interação do adesivo com a madeira. No entanto, as coníferas brasileiras apresentam grande quantidade de defeitos naturais, resultando em uma grande perda de material (ICIMOTO, 2013).

As características da madeira utilizada podem afetar diretamente na capacidade de colagem do material, como também sua resistência mecânica final. Por isso, é muito importante o estudo principalmente da combinação espécie-adesivo na produção de elementos de MLC.

A grande maioria dos trabalhos sobre elementos de MLC encontrados na literatura são focados nas madeiras de Pinus e Eucalyptus (TEREZO e SZÜCS, 2010).

Porém outras espécies provenientes de reflorestamento, como o Cedro australiano e o Cedro indiano, recentemente introduzidas no mercado brasileiro, podem ser utilizadas para a produção de elementos de MLC desde que estudos sejam realizados para a garantia de bons resultados.

3.2.1 Eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*)

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae*, é da classe das angiospermas dicotiledôneas (ou folhosas), conta com cerca de 3000 espécies, e é originária da Austrália, porém já se espalhou para quase todas as regiões tropicais e subtropicais do planeta (LAVABRE, 2001).

Esse gênero foi introduzido no Brasil em 1868, porém, até início do século XX, as espécies de *Eucalyptus* eram utilizadas apenas como arborização de ruas ou como quebra-ventos. O seu cultivo em escala econômica iniciou em 1903 (SILVEIRA, 2004; VALVERDE, 2007), e se tornou a espécie florestal mais usada nos programas de reflorestamento no Brasil, pela sua boa adaptação às condições climáticas e rápido crescimento (SANTOS *et al.*, 2005)

O gênero *Eucalyptus* possui variadas espécies, com densidades variando entre 0,50 g/cm³ e 1,0 g/cm³, e apresentam boa resistência mecânica, alta durabilidade natural contra agentes xilófagos por conta do cerne de alta densidade, e baixa tendência a rachaduras (ZENID *et al.*, 2009), além de possuírem grande versatilidade de uso em diversos segmentos, como para extração de óleos essenciais, celulose, madeira serrada, carvão vegetal, painéis, produtos engenheirados, entre outros (GARCIA e MORA, 2000).

Para trabalhar com a madeira de Eucalipto serrada é necessário conhecer a estrutura do material, os parâmetros de usinagem e utilizar técnicas adequadas para obter bons resultados de usinagem, pois, durante a fase de crescimento, essa madeira acumula tensões que são liberadas no processo de desdobro, resultando em peças de má qualidade (ZENID *et al.*, 2009).

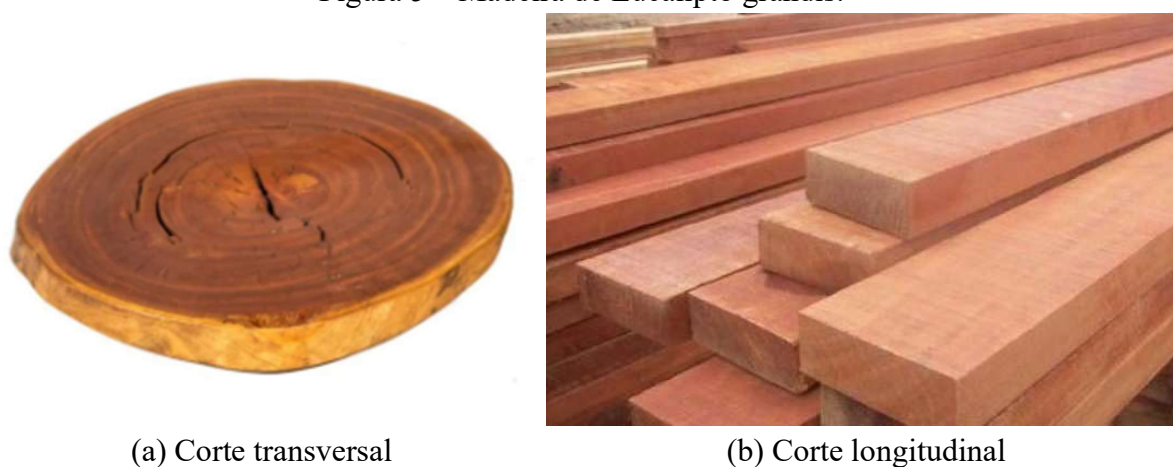
As espécies de *Eucalyptus* mais utilizadas no mundo são o *Eucalyptus grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna* e *E. citriodora* (GARCIA e MORA, 2000), atualmente denominada como *Corymbia citriodora*.

O Eucalipto *grandis* (*Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden) vem sendo cultivada no Brasil há décadas e é a espécie mais plantada no país devido ao seu potencial produtivo e às

características da madeira, sendo amplamente utilizada na produção de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerado, combustível industrial, e produtos de serraria (SOAREZ *et al.*, 2003; SOUZA *et al.*, 2004).

A madeira de *Eucalypto grandis* (Figura 5) possui o cerne distinto do alburno, a coloração do cerne é castanho-rosado e do alburno bege-rosado, possui anéis de crescimento distintos e individualizados por zonas fibrosas tangenciais mais escuras, grã direita, textura moderada, brilho moderado e cheiro imperceptível (ZENID *et al.*, 2009).

Figura 5 – Madeira de *Eucalypto grandis*.



Fonte: For nature woods (2022).

O *Eucalypto grandis* possui densidade aparente de $0,64 \text{ g/cm}^3$ (ABNT, 1997), retração radial de 5,3%, retração tangencial de 8,7% e retração volumétrica de 15,7% (IPT, 1989).

Em relação as propriedades mecânicas, a madeira possui resistência à compressão e tração paralela às fibras de 40,3 MPa e 70,2 MPa, respectivamente, e módulo de elasticidade de 12813 MPa (ABNT, 1997).

Sua trabalhabilidade é excelente para serraria, apresentando boas características de aplainamento, lixamento, torneamento, furação e acabamento, porém, é necessário utilizar técnicas apropriadas de desdobro para reduzir os efeitos das tensões de crescimento.

3.2.2 *Pinus elliottii* (*Pinus elliottii* var. *elliottii*)

O gênero *Pinus* é da família *Pinaceae* e originária do hemisfério norte. Esse gênero possui mais de 100 espécies, e foram introduzidas no Brasil por volta de 1936 para fins ornamentais, mas a partir de 1960 deu-se início ao plantio em escala comercial para produção de madeira nas regiões Sul e Sudeste (WREGGE *et al.*, 2014).

As espécies de *Pinus* mais disseminadas no Brasil são o *Pinus elliottii* e *P. taeda*, originários dos Estados Unidos, e as tropicais *P. caribaea* e *P. oocarpa*, em menor escala. Em 2019, o plantio de *Pinus* atingiu 1,64 milhões de hectares no Brasil, correspondente a 18% da área total de florestas plantadas no país (IBÁ, 2020).

O *Pinus elliottii* (Figura 6) possui madeira branco-amarelado, com cerne e alburno indistintos pela cor, anéis de crescimento bem distintos com transição brusca entre o lenho inicial e o tardio, brilho moderado, cheiro e gosto distintos e característicos por conta da resina, densidade baixa, é macia ao corte, com grã direita e textura fina, apresenta boa usinabilidade e é fácil de secar, possui baixa durabilidade natural, sendo susceptível ao ataque de fungos, cupins, brocas de madeira e perfuradores marinhos, porém de fácil tratamento, e apresenta defeitos como nós (ZENID *et al.*, 2009).

Figura 6 – Madeira de *Pinus elliottii*.



(a) Corte transversal

(b) Corte longitudinal

Fonte: For nature woods (2022).

O *Pinus elliottii* possui densidade aparente de $0,56 \text{ g/cm}^3$, retração radial de 3,4%, tangencial de 6,3% e volumétrica de 10,5%. Essa espécie também apresenta boas propriedades mecânicas de resistência à compressão e tração paralela às fibras (40,4 MPa e 66,0 MPa, respectivamente), resistência a tração normal às fibras (2,5 MPa), entre outras propriedades (IPT, 1989; ABNT, 1997).

A madeira de *Pinus* possui boa trabalhabilidade, sendo fácil de desdobrar, aplinar, desenrolar, lixar, toronar, furar, secar e bom acabamento, com uma ampla variedade de uso, sendo os principais na construção civil, na fabricação de móveis, partes internas de móveis, móveis torneados (para exportação), painéis compensados, laminados, peças torneadas, ripas e tábuas para embalagens, celulose e papel, entre outros.

3.2.3 Cedro australiano (*Toona ciliata*)

Diante da preocupação quanto ao abastecimento futuro de madeira, gerado pelo aumento da demanda por produtos derivados desse material, o Cedro Vermelho Australiano (*Toona ciliata* M. Roem. var *australis*) surge como uma nova e promissora espécie de reflorestamento.

Essa espécie pertence à família *Meliaceae*, assim como o mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla*) e os cedros nativos (*Cedrela odorata* e *Cedrela fissilis*), e é conhecida no Brasil como Toona, Cedro australiano e Cedrão (PINHEIRO *et al.*, 2003).

O Cedro australiano encontrou no Brasil condições favoráveis ao seu desenvolvimento, pois a temperatura média para o seu melhor crescimento está entre 20 e 26 °C. A espécie tem alta taxa de crescimento, associada à boa qualidade e resistência ao ataque de mariposa de ponta, praga esta que afeta os cedros nativos e o mogno brasileiro (PINHEIRO *et al.*, 2003; MURAKAMI, 2008; BYGRAVE & BYGRAVE, 2005).

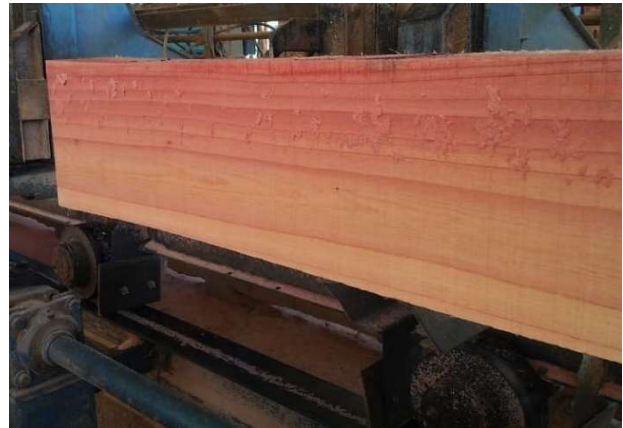
Essa espécie apresenta rápido crescimento, chegando a atingir 8 m de altura e 15 cm de diâmetro com três anos de idade (Pinheiro *et al.*, 1994), proporcionando, assim, um bom retorno financeiro em curto espaço de tempo, quando comparado aos cedros nativos e a outras espécies florestais, inclusive o mogno (Nassur *et al.*, 2013).

A madeira do Cedro australiano (Figura 7) possui cerne e albúrneo distintos, apresenta coloração marrom-avermelhada, sem brilho, anéis de crescimento distintos, durabilidade mediana, é de fácil desdobro (boa trabalhabilidade) apesar de ser relativamente macia, e possui textura média e uniforme, com grã levemente reversa. Após seca é estável e exala um agradável odor após processada (LAMPRECHT, 1990; GIBBS, 2005; TRIANOSKI *et al.*, 2014).

Figura 7 – Madeira de Cedro australiano.



(a) Corte transversal



(b) Corte longitudinal

Fonte: Vale do Cedro (2022).

Em relação as propriedades físicas, a madeira apresenta densidade aparente que varia entre 0,31 g/cm³ e 0,42 g/cm³ (SIMPSON, 1996; PEREYRA *et al.*, 2006; ZIECH, 2008; TRIANOSKI *et al.*, 2014), retração axial de 0,3%, retração radial de 4,11%, retração tangencial de 7,85%, e coeficiente de anisotropia de 1,9 (PEREYRA *et al.*, 2006).

O Cedro australiano fornece madeira de qualidade para uso na marcenaria e construção civil, sendo bastante plantado visando à produção de madeira serrada. Os principais usos dessa madeira são na indústria de contraplacados, compensados e móveis, e na indústria da construção civil, na fabricação de portas, janelas e porteiros. Também é utilizada na indústria de construção naval, aeronáutica, na confecção de instrumentos musicais e na arborização de parques e jardins (PINHEIRO *et al.*, 2003; NISGOSKI *et al.*, 2011).

3.2.4 Cedro indiano (*Acrocarpus fraxinifolius*)

Outra espécie introduzida no Brasil, com o intuito de suprir a demanda por produtos de madeira e aumentar as possibilidades do mercado com alternativas mais rentáveis e de rápido crescimento, é o Cedro indiano (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn).

Essa espécie pertence à família *Fabaceae*, subfamília *Caesalpinioideae*, e é popularmente conhecido por Acrocarpo, Mundane, Árvore de ripa, Cedro rosado e Lazcar (LORENZI *et al.*, 2003). E é nativo das regiões tropicais da Ásia, como Índia, Mianmar (Birmânia), Bangladesh, Indonésia e Nepal (CARVALHO, 2003; VENTURIN *et al.*, 2014).

Assim como o Cedro australiano, essa espécie também se enquadra nos padrões de rápido crescimento, sendo considerada promissora para reflorestamento, podendo atingir de 15 a 30 metros de altura, diâmetro do tronco de 30 a 50 cm, com folhas compostas e bipinadas, (LORENZI *et al.*, 2003; PRADO *et al.*, 2003; MARTÍNEZ *et al.*, 2006; TRIANOSKI *et al.*, 2011).

O desenvolvimento dessa espécie ocorre melhor em temperaturas de 19 a 28 °C, em regiões que não há ocorrências de geadas, e se adaptam em solos francos (com quantidades equivalentes de areia, silte e argila, sendo mais pegajosos que os arenosos), argilosos, rasos e compactados (PINHEIRO *et al.*, 2003), fazendo da espécie uma candidata à produção de madeira de curta rotação (MAGHEMBE e PRINS, 1994).

A madeira do Cedro indiano (Figura 8) possui cerne e alburno distintos, é relativamente dura, de coloração variando do bege claro ao rosado com cor avermelhada no cerne, grã regular,

textura média, possui fibras curtas, apresenta baixo teor de lignina e alto teor de extrativos totais, e seu processamento e colagem é relativamente fácil (HONORATO *et al.*, 2005).

Figura 8 – Madeira de Cedro indiano.



(a) Corte transversal

(b) Corte longitudinal

Fonte: Vale do Cedro (2022).

Em plantios experimentais no Brasil, a produtividade apresentou um incremento médio de 14 a 45 m³/ha/ano, sendo que as regiões ao norte do Paraná, sudeste e centro-oeste do país são as mais recomendadas para o plantio desta espécie (CARVALHO, 1998).

As propriedades mecânicas do Cedro indiano são praticamente desconhecidas no Brasil, sendo encontrados apenas alguns estudos sobre as suas características físicas, os quais apresentam valores de densidade aparente variando entre 0,44 g/cm³ a 0,50 g/cm³ (PRADO *et al.*, 2003; HONORATO *et al.*, 2005; TELLO, 2009; TRIANOSKI, 2010; SUIREZS *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2022), e coeficientes de retração entre 0,46% a 0,7% na direção axial, de 2,0% a 3,0% na direção radial e de 4,3% a 5,4% na direção tangencial, com coeficiente de anisotropia entre 2,0 a 1,8 (PRADO *et al.*, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Outros estudos mostram que essa espécie possui baixa durabilidade natural, fácil impregnação por preservantes, fácil processamento e colagem (HONORATO *et al.*, 2005).

Por sua semelhança física com as espécies *Fraxinus excelsior* e *Juglans regia*, o Cedro indiano é muito utilizado como substituto na confecção de móveis, produção de celulose e na construção civil (LORENZI *et al.*, 2003; PRADO *et al.*, 2003; HONORATO *et al.*, 2005; FIRMINO *et al.*, 2015; MISHRA *et al.*, 2015; REIS *et al.*, 2019).

3.3 FATORES QUE AFETAM A COLAGEM

Existem vários fatores que podem influenciar na colagem entre lamelas na confecção de elementos de MLC. Alguns desses fatores são ligados à espécie de madeira utilizada e podem ser anatômicos, físicos ou químicos, tais como densidade, porosidade, rugosidade da superfície e teor de umidade; e outros são ligados ao adesivo, como pressão de colagem, viscosidade, composição química, tempo de cura etc. (FRIHART e HUNT, 2010; CALIL NETO, 2011).

3.3.1 Densidade da madeira

A densidade é uma propriedade física que tem grande influência na qualidade da adesão das lamelas, pois quanto mais denso o material, menor será o volume de vazios em seu interior.

Portanto, acredita-se que madeiras com densidades elevadas podem prejudicar a penetração do adesivo, provocando diminuição no preenchimento dos vazios necessários para uma boa ancoragem durante a cura, resultando em redução da capacidade de resistência a esforços do adesivo (VICK, 1999; PLASTER *et al.*, 2008). Uma alternativa para essa questão seria a utilização de adesivos com menor viscosidade.

Segundo a normativa ABNT NBR 7190-3 (2022), as espécies mais aconselhadas para uso em elemento de MLC são aquelas com densidade até 0,75 g/cm³, pois valores de densidade superiores resultam em uma maior solicitação da linha de cola, aumentando a ocorrência de falhas no adesivo. Nesse sentido, algumas folhosas de baixa densidade, podem ser consideradas para essa aplicação, como o Cedro indiano e o Cedro australiano.

Estudos realizados por Plaster *et al.* (2008) concluíram que a porcentagem de falhas que ocorrem na madeira em ensaios de cisalhamento é inversamente proporcional à densidade da madeira. Quanto maior a densidade da madeira, maior será a dificuldade de penetração do adesivo em seu interior, diminuindo o ancoramento do adesivo, prejudicando a sua adesão e diminuindo a resistência da linha de cola. Porém, esse problema pode ser amenizado através da utilização de uma maior pressão de colagem ou de adesivos de menor densidade.

3.3.2 Porosidade e permeabilidade da madeira

A porosidade da madeira está diretamente relacionada com a sua densidade, e tem influência na penetração do adesivo, pois quanto maior for a densidade da madeira, menos poros

ela apresentará, podendo resultar numa linha de cola espessa. Por outro lado, quanto mais porosa for a madeira, maior será a penetração do adesivo em sua estrutura interna, podendo resultar em linha de cola “faminta”, comprometendo a resistência de colagem (ALBUQUERQUE e LATORRACA, 2000).

Permeabilidade é uma propriedade que quantifica a capacidade de fluidez de um determinado líquido no interior da madeira. Em uma mesma árvore, as regiões de alborno e cerne podem possuir diferentes taxas de permeabilidade, pois essa propriedade está diretamente associada ao grau de porosidade.

A permeabilidade também é afetada pela direção ortogonal da madeira na qual ocorre a penetração do líquido, por exemplo, na direção longitudinal a permeabilidade é mais eficiente do que na direção radial (ALBUQUERQUE e LATORRACA, 2005; SILVA *et al.*, 2010).

Tanto a porosidade como a permeabilidade afetam a colagem entre elementos de madeira, pois a adesão mecânica depende da penetração do adesivo nos espaços vazios do material, para que durante a cura ocorra a fixação por ancoramento. Se a penetração ocorrer em profundidade excessiva, conhecida como “linha de cola faminta”, uma ligação fraca pode ser gerada, resultando em baixos valores de resistência da linha de cola. Enquanto a baixa penetração do adesivo na madeira pode causar uma “linha de cola espessa”, na qual a ancoragem do adesivo na madeira é insuficiente gerando ligações fracas e baixos valores de resistência das linhas de cola (ALBUQUERQUE e LATORRACA, 2005).

3.3.3 Teor de umidade da madeira

O teor de umidade da madeira é um fator de grande importância na colagem das peças com adesivo. Na fabricação de elementos de MLC, o teor de umidade ideal das lamelas varia entre 6 e 12% (MOTTA *et al.*, 2012).

Segundo a norma norte-americana ASTM D3737 (2018), o teor máximo permitido é de 16%, e a faixa de variação a ser utilizada em uma mesma peça não deve exceder a 5%, sendo necessário realizar um controle de umidade na entrada do processo de fabricação, a fim de assegurar essa variação, garantindo dessa forma uma melhor adesão entre os materiais.

A colagem de madeiras com teores de umidade muito acima ou abaixo desses valores indicados anteriormente podem resultar em defeitos como rachaduras, empenamentos, juntas abertas e descolamento, além de necessitar de maior tempo de prensagem para que a umidade da madeira fique em equilíbrio com a umidade ambiente (PROPERZI *et al.*, 2003).

3.3.4 Teor de extrativos da madeira

A composição química da madeira, principalmente o teor de extrativos, influenciam na colagem de madeiras pois, durante o processo da cura ou secagem que utiliza temperaturas elevadas, os extrativos tendem a migrar para a superfície, se concentrando e bloqueando o contato do adesivo com a madeira (JANKOWSKY, 1979).

Esse acúmulo de extrativos impede o ancoramento do adesivo após a cura, além de poderem conter resinas insolúveis em água e óleos voláteis hidrofóbicos, que repelem a água, gerando inúmeros problemas de umedecimento, fluxo e penetração da superfície, gerando uma fraca ligação mecânica (SKEIST, 1990).

Os extrativos também podem influenciar e modificar o pH da superfície da madeira, no qual um extrativo que possui caráter ácido pode acelerar a cura de um adesivo alcalino, reduzindo o umedecimento, fluxo e penetração na madeira. Enquanto um adesivo ácido pode ter seu tempo de cura prolongado (BLOMQUIST, 1983).

3.3.5 Rugosidade da superfície da madeira

A textura ou rugosidade da madeira tende a variar de uma espécie para outra, e é considerada um dos fatores que mais influenciam no processo de adesão, pois influencia diretamente na penetração do adesivo no interior da madeira e na formação das uniões (FRIHART, 2011).

A textura da madeira é fundamental para a ligação do adesivo, pois, essa irregularidade da superfície pode proporcionar ganchos mecânicos para a ancoragem do adesivo, fator que contribui para o aumento da adesão (SCHULTZ e NARDIN, 2003; ALLEN, 2005; PACKHAM, 2005).

Essa rugosidade da superfície é influenciada pela estrutura anatômica da madeira, particularmente as cavidades celulares, e também varia com o tipo de processo de usinagem e com o cuidado com o qual o processo é realizado (KILIC *et al.*, 2006).

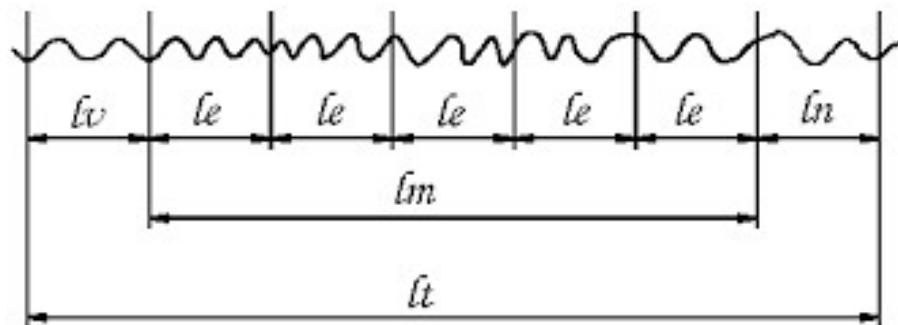
Ao ser usinada, as fortes ligações moleculares entre os componentes da madeira são rompidas, criando locais de ligação abertos com elevadas forças atrativas. Quanto maior for o número de locais de ligação, maior será a atração total (CUSTÓDIO *et al.*, 2009).

A medição da rugosidade superficial de produtos de madeira pode ser realizada por diversos métodos, como rugosímetro de agulha, perfilometria óptica, análise de imagens

técnicas usando câmera de vídeo, pneumática, ultrassom e microscopia. Porém, mesmo com tantos métodos, a avaliação de irregularidades em madeira maciça não é de uso frequente na indústria tanto quanto para outros materiais engenheirados (KILIC *et al.*, 2006).

A norma internacional ISO 4287 (2002) apresenta vários conceitos, nomenclaturas e critérios para a avaliação da rugosidade superficial de materiais. Os comprimentos considerados importantes para a avaliação da rugosidade de uma superfície são (Figura 9):

Figura 9 – Comprimentos considerados para avaliação da rugosidade.



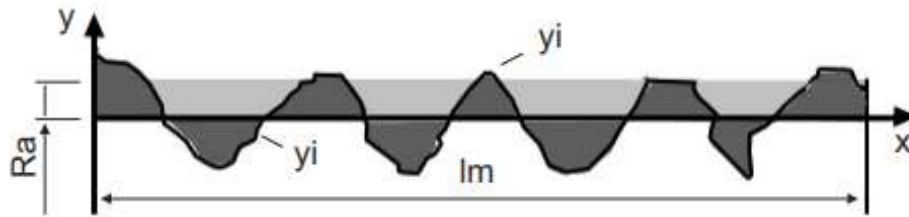
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 4287 (2002).

- l_t : comprimento total de medição;
- l_m : comprimento do percurso de medição;
- l_e : comprimento de amostragem, também chamado de *cut-off*;
- l_v : comprimento para atingir a velocidade de medição;
- l_n : comprimento para parada do apalpador.

A norma recomenda que o rugosímetro tire cinco medições de comprimentos de amostragem (l_e) durante o percurso de medição (l_m) para indicar um valor médio de rugosidade. Os comprimentos l_v e l_n (primeira e última parte do trecho total de medição) não são utilizadas na avaliação da rugosidade, sendo utilizadas com a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas do sistema, e para ajuste do perfil de rugosidade.

A rugosidade média (R_a) é o parâmetro mais utilizado para expressar a rugosidade de uma superfície, e é definido como a média aritmética entre a variação vertical (picos e vales) da superfície (y_i) e o deslocamento horizontal do sensor (agulha) no percurso de medição (l_m). A Figura 10 apresenta este parâmetro de avaliação da rugosidade.

Figura 10 – Representação do parâmetro Ra.



Fonte: Castro (2000).

3.3.6 Molhabilidade do adesivo

A molhabilidade de um material é descrita como a capacidade que um líquido adesivo possui de se espalhar sobre a superfície da madeira, promovendo a adesão entre o material e o adesivo. A molhabilidade é influenciada pelas propriedades físicas e químicas do adesivo e da superfície de adesão (JENNINGS, 2003).

Na madeira esse processo ocorre por meio de três fenômenos: a produção de um ângulo de contato devido à interação do adesivo com a superfície (umectação), o escoamento e espalhamento do adesivo sobre a superfície em um tempo razoável (fluidez), e a capacidade que o adesivo possui de entrar pelos poros e espaços vazios da superfície do material (penetração) (FRIHART, 2005).

Se a molhabilidade do adesivo for muito baixa, a penetração do adesivo na madeira não será o suficiente para garantir uma interação madeira-adesivo adequada, por outro lado, se a molhabilidade for muito alta, irá causar penetração excessiva, e a linha de cola não permanecerá com adesivo suficiente para ligar as superfícies a serem coladas.

A rugosidade da superfície, o tipo de madeira, o tipo de secagem e o plano de corte (tangencial e transversal) afetam a molhabilidade do adesivo, influenciando no espalhamento e penetração do material (SHUPE *et al.*, 2001).

3.3.7 Viscosidade do adesivo

A viscosidade de um líquido é a propriedade dos fluidos que corresponde ao seu transporte, e pode ser definida como a resistência que um líquido oferece ao fluxo e é medida em cP (centipoise) ou mPa.s (milipascal-segundo). A viscosidade dos adesivos influi no espalhamento, penetração e umectação do adesivo na madeira e pode determinar o seu tempo de validade (ALMEIDA, 2009; AZEVEDO, 2009).

Para uma melhor colagem da madeira são desejados valores medianos de viscosidade. Quanto maior o valor da viscosidade, maior será a dificuldade de espalhamento e penetração do adesivo na madeira, pois a viscosidade desfavorece as propriedades de umectação, causando penetração insuficiente na estrutura da madeira, resultando em uma linha de cola espessa e afetando a qualidade de colagem. Porém, um valor de viscosidade muito baixo pode causar penetração e absorção excessiva do adesivo na estrutura da madeira, gerando assim uma linha de cola faminta (PETRIE, 2000; ALMEIDA, 2009).

3.3.8 pH do adesivo

O pH do adesivo tem influência sobre a colagem, podendo reduzir a resistência da linha de cola, sendo também um determinante para a sua validade. A interação entre o pH do adesivo com o pH da madeira influenciam diretamente na velocidade de cura do adesivo, no grau das reações e nas configurações moleculares durante o processo de colagem, sendo um fator importante no controle de qualidade na fabricação de elementos de MLC (MARRA, 1992).

Para que não ocorra a degradação química das fibras da madeira, o pH do adesivo não deve ultrapassar os valores mínimos e máximos de 2,5 e 11, respectivamente (IWAKIRI, 2005). O pH do adesivo também pode entrar em conflito com o pH da madeira se apresentarem diferenças significativas, resultando em prejuízos na cura do adesivo, podendo também causar descoloração da madeira por conta da alcalinidade de alguns adesivos (MARRA, 1992).

3.3.9 Pressão e tempo de colagem

A pressão de colagem utilizada na fabricação de elementos de MLC é um fator que influencia na penetração do adesivo na madeira, afetando a resistência final da colagem.

Ao aplicar uma pressão elevada há movimentação excessiva do adesivo, que acaba sendo expulso para fora da linha de cola antes que haja penetração suficiente para uma boa colagem. Porém, ao se aplicar uma pressão muito baixa, a penetração do adesivo também pode não ser o suficiente para promover uma adequada interação entre as lamelas (NASCIMENTO *et al.*, 2002).

Para madeiras com densidade inferior ou igual a $0,50 \text{ g/cm}^3$, a pressão mínima de colagem necessária recomendada é de 0,7 MPa, e para madeiras com densidade superior a $0,50 \text{ g/cm}^3$, a pressão necessária é de 1,2 MPa (AZAMBUJA, 2006).

Esses valores de pressão de colagem também são os especificados pelo método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022), que faz parte da norma brasileira de estruturas de madeira ABNT NBR 7190-1 (2022).

Em relação ao tempo de prensagem é necessário observar as instruções de cada fabricante de adesivo, pois alguns adesivos possuem cura à temperatura ambiente e necessitam que as lamelas sejam mantidas sob pressão até que se atinja a resistência suficiente para suportar os esforços internos que tendem a separá-las.

3.3.10 Temperatura de colagem

A temperatura de colagem é um fator importante na confecção de elementos de MLC, uma vez que afeta a qualidade da adesão entre as lamelas. A temperatura ideal pode variar dependendo do tipo de adesivo utilizado e das condições ambientais durante o processo.

É recomendado que a temperatura do ambiente no momento da colagem esteja na faixa de 20 °C, pois isso influencia no tempo de cura e na viscosidade do adesivo, ou seja, na capacidade de espalhamento e de penetração do adesivo na madeira (MELOTTO, 2007).

Em geral, a temperatura de colagem ideal deve ser mantida dentro da faixa recomendada pelas instruções de uso do fabricante do adesivo. O controle da temperatura durante o processo de colagem é essencial para garantir que o adesivo cure adequadamente.

3.4 ADESIVOS UTILIZADOS PARA MLC

Segundo a ABNT NBR 7190-1 (2022), o adesivo utilizado para a produção de elementos estruturais de MLC deve ser resistente e à prova d'água. Na definição do adesivo a ser utilizado também deve ser levado em consideração o meio em que a estrutura será inserida, ou seja, se irá permanecer abrigada no interior da edificação ou exposta a variações atmosféricas, e fatores como a temperatura e o teor de umidade de exposição da estrutura no local de sua construção.

Uma importante característica dos adesivos para elementos de MLC é a capacidade de manter sua durabilidade e integridade ao longo da vida da peça, produzindo ligações com alta resistência e durabilidade que suportem as condições de uso (CRUZ e CUSTÓDIO, 2010).

Existem diversos tipos de adesivos estruturais indicados para a fabricação de elementos de MLC no mercado. Os principais adesivos utilizados, neste caso, são: caseínas, melamina-

uréia-formaldeído, melamina-formaldeído, resorcinol-formaldeído, fenol-resorcinol-formaldeído e fenol-formaldeído (IWAKIRI, 2005; BURATTA, 2019).

Os adesivos a base de caseína e de uréia-formaldeído apresentam bom desempenho de trabalho em locais internos e protegidos de climas severos. Já os adesivos fenol-formaldeído e resorcinol-formaldeído podem ser aplicados em qualquer situação (DUNKY, 2003).

Porém, tem-se buscado utilizar adesivos com baixa ou nenhuma emissão de formaldeído, pois esse composto, liberado pelo adesivo no processo de fabricação e durante o uso do painel de madeira, é um agente cancerígeno confirmado para seres humanos (WANG *et al.* 2018).

Dentre as alternativas, um tipo de adesivo frequentemente utilizado na confecção de elementos de MLC são os adesivos poliuretanos, que apresentam alto desempenho mecânico e devem ter controle da umidade de colagem. Os adesivos poliuretanos apresentam custo mais acessíveis e, atualmente, existem vários tipos destes adesivos disponíveis no Brasil (BERTOLINI *et al.*, 2014; NASCIMENTO *et al.*, 2015).

3.4.1 Adesivo à base de Resorcinol-Formaldeído

Os adesivos do tipo resorcinol-formaldeído são comercializados na forma líquida e utilizam um reagente endurecedor que deve ser misturado pouco antes de sua utilização, evitando o endurecimento rápido e a perda do material. E em decorrência da reatividade do adesivo, são mais utilizados em estruturas de madeira expostas à temperatura ambiente (JESUS, 2000; CARNEIRO, 2010).

Esse adesivo foi criado pela necessidade do mercado, cuja demanda era por um adesivo impermeável e que pudesse ser utilizado em baixas temperaturas, associada à alta resistência estrutural, suportando além das alterações climáticas outras intempéries que viessem a ocorrer, mantendo sua resistência em relação ao carregamento (JESUS, 2000). A hidroxila adicional no resorcinol faz com que a reação com o formaldeído seja mais rápida e apresente uma ligação melhor do que o fenol-formaldeído, fazendo com que o resorcinol-formaldeído tenha uma alta durabilidade a ambientes externos (DRESSLER, 1994).

Apesar de ser um adesivo muito utilizado na fabricação de elementos estruturais de MLC, o seu custo é relativamente alto, e necessita de muitas horas para que haja a cura completa da linha de cola em temperatura ambiente.

Em relação a sua resistência, estudos realizados por Segundinho *et al.* (2017) concluíram que o resorcinol-formaldeído é um dos adesivos que apresentam bons resultados de

delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, pois possuem uma boa penetração na madeira, mesmo em peças tratadas com produtos preservantes.

No presente trabalho, foi utilizado o adesivo resorcinol-formaldeído comercializado com o nome Cascophen RS-216-M, da fabricante *Momentive*, recomendado para colagens que necessitam de resistência à água fria e quente, solventes orgânicos, fungos, calor e umidade.

O adesivo Cascophen RS-216-M é indicado para uso em materiais cuja colagem ficará exposta temporariamente ou definitivamente às ações climáticas ou outras intempéries, onde é necessário resistência a água fria ou quente, solventes orgânicos, fungos e mofo, calor seco ou úmido etc., como barcos, escadas, caixas d'água, hélices, elementos de MLC, entre outros.

Este adesivo é bicomponente, sendo um o adesivo, de cor marrom avermelhada, e o outro o endurecedor, na forma de pó de cor bege. A mistura sofre endurecimento em aproximadamente 2 horas a 20°C e em aproximadamente 1 hora a 30°C. O tempo mínimo de prensagem varia em função da temperatura ambiente, sendo de 6 horas (32°C) a 14 horas (20°C). O tempo necessário para que a colagem atinja sua resistência máxima é de 8 dias (MOMENTIVE, 2011).

Baixas temperaturas elevam a viscosidade da cola, reduzindo sua penetração, portanto a adição de até 5% de álcool (98%) é recomendada pelo fabricante quando o adesivo estiver muito viscoso ou quando seja necessário melhorar a penetração em algumas madeiras duras. Aquecer o adesivo após sua aplicação na madeira não aumenta a penetração, resultando numa colagem muito fraca ou defeituosa (MOMENTIVE, 2011).

3.4.2 Adesivo à base de Poliuretano

O adesivo poliuretano foi desenvolvido por Otto Bayer em 1937 pela reação química entre um poliálcool e um pré-polímero (SILVA *et al.*, 2013).

Esse adesivo garante boa aderência entre os materiais unidos, resistência química satisfatória, alta resistência mecânica, alta resistência à umidade e temperatura, sendo indicado para uso em diferentes segmentos industriais, pois é de fácil adaptação a diversos substratos (STROBECH, 1990).

Além disso, apresenta custos inferiores aos adesivos à base de resorcinol-formaldeído, sendo ainda biodegradável e não agressivo ao organismo humano, pois é livre de solventes e exige menor consumo de água (AZAMBUJA, 2002; CUNHA e MATOS, 2011).

A maioria dos adesivos (ou resinas) poliuretanos são encontrados no mercado de duas formas: as monocomponentes, que possuem polímero e agente de reticulação juntos, e as bicomponentes, na qual os compostos são misturados no momento da colagem.

Na confecção de elementos estruturais de MLC, a cura desse tipo de adesivo ocorre somente em temperatura ambiente (STROBECH, 1990; JESUS, 2000), e são mais utilizados em países da América do Norte e Europa (GRANDMONT *et al.*, 2019) e em pesquisas em escala laboratorial (VILGUTS *et al.*, 2015; TURESSON *et al.*, 2020).

O adesivo poliuretano utilizado nesta pesquisa foi o bicomponente AG101, da fabricante Kehl® Indústria e Comércio LTDA-ME, sendo composto por um isocianato polifuncional e por um poliól para aglomerante derivado de óleos vegetais (óleo de mamona). Nesse adesivo, os componentes são misturados na proporção de 1:1, para a obtenção de adesivo resistente utilizado na colagem de madeiras para ambientes externos (KEHL, 2011).

Esse adesivo poliuretano à base de mamona é oriundo da planta *Ricinus communis*, um recurso natural e derivado de fonte renovável, não agressivo ao ser humano e ao meio ambiente, é resistente ao calor e a água, biodegradável, impermeável, e não apresenta solventes em sua composição, podendo ser preparado em temperatura ambiente (DIAS, 2005; BERTOLINI *et al.*, 2013; NASCIMENTO *et al.* 2015).

Por sua versatilidade, esse material também pode ser utilizado em implantes ósseos, revestimentos internos e na confecção de diferentes tipos de painéis, como aglomerados, estruturais e compensados (CANGEMI *et al.*, 2008).

3.5 NORMAS INTERNACIONAIS DE CONTROLE DA QUALIDADE DA MLC

No Brasil, até o ano de 2021, não existia uma norma específica para o controle da qualidade de elementos de MLC. A norma brasileira de estruturas de madeira ABNT NBR 7190 (1997) descrevia alguns procedimentos simplificados de ensaios para elementos de MLC em seu Anexo B. Esses ensaios deviam ser realizados em amostras isentas de defeitos e abrangiam ensaios de tração em emendas dentadas paralelamente às fibras da madeira, tração normal à linha de cola e cisalhamento na linha de cola paralelo às fibras da madeira.

Portanto, os ensaios realizados para avaliação das propriedades dos elementos estruturais de MLC eram baseados nas normas americanas ASTM D2559 (2004), D4688 (2014) e D198 (2015), nas normas europeias EN 14080 (2013) e EN 408 (2011), e nas normas canadenses CSA 112.9 (2004) e CSA 112.10 (2007), entre outras.

Nos itens seguintes apresenta-se um resumo das principais considerações relativas aos métodos de ensaios para o controle da qualidade de elementos de MLC propostos por diferentes países.

3.5.1 Normas americanas: ASTM D2559, D4688 e D198

Nos Estados Unidos, a *American Society for Testing and Materials* – ASTM é o órgão responsável pelo desenvolvimento e publicação das normas técnicas para uma ampla gama de materiais, produtos, sistemas e serviços.

As normativas americanas utilizadas para controle de qualidade de elementos estruturais de MLC são a ASTM D2559 (2004) (*Standard specification for adhesives for structural laminated wood products for use under exterior exposure conditions*), a ASTM D4688 (2014) (*Standard test method for evaluating structural adhesives for finger jointing lumber*) e a ASTM D198 (2015) (*Standard test of static tests of lumber in structural sizes*).

A norma ASTM D2559 (2004) dispõe sobre os procedimentos necessários para avaliação dos adesivos aplicados entre as lamelas em elementos estruturais de MLC destinados a ambientes externos, sujeitos à exposição de umidade. Analisa-se nesta norma a resistência ao cisalhamento, a delaminação das linhas de cola e a fluência oriunda de carregamento estático, garantindo-se assim uma melhor eficiência, resistência e durabilidade do produto final.

Os corpos de prova usados são extraídos de elementos estruturais com dimensões pré-estabelecidas e podem ser confeccionados a partir de qualquer espécie de madeira, sendo recomendado a utilização de madeiras utilizadas pela indústria americana.

Nos ensaios de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, com elementos confeccionados com madeiras não recomendadas, é necessário realizar o ensaio de cisalhamento da madeira sólida da espécie que está sendo analisada.

Nos ensaios de delaminação da linha de cola, para ambientes expostos à umidade, as amostras são submersas em água dentro de uma autoclave, onde são aplicados ciclos de vácuo-pressão, secagem em estufa e aplicação de ciclo de vapor por períodos pré-determinados.

Para ser aprovado, o adesivo precisa atender as condições mínimas impostas pela norma ASTM D2559 (2004) para a resistência ao cisalhamento, para uma porcentagem de ruptura na madeira e para uma porcentagem de abertura permitida em cada linha de cola, que deve ser menor do que 1% para amostras de coníferas e menor que 1,6% para amostras de folhosas.

A norma ASTM D4688 (2014) dispõe sobre a resistência dos adesivos estruturais usados nas emendas dentadas, e recomenda ensaios para a verificação da tração das emendas sobre três diferentes situações de preparação de amostra: seco, úmido após um ciclo de vácuo-pressão e úmido após cinco ciclos com água fervente. Nessa metodologia, as amostras isentas de defeitos são retiradas dos elementos estruturais, ou podem ser produzidas em laboratório desde que confeccionadas de forma igual àquelas produzidas pelas empresas.

Por fim, a norma ASTM D198 (2015) apresenta os procedimentos para obtenção do MOR e MOE das vigas estruturais de MLC por meio de ensaio de flexão estático de quatro pontos (cargas aplicadas nos terços do vão da viga).

3.5.2 Normas canadenses: CSA 112.9 e CSA 112.10

No Canadá, a *Canadian Standards Association* – CSA é a organização responsável pela publicação das normativas para avaliar produtos, processos e serviços, e disponibilizar treinamento e serviços de consultoria para a indústria, governo e consumidores.

Para o controle de qualidade dos adesivos destinados à produção de elementos estruturais de MLC, as normativas utilizadas são a CSA 112.9 (2004) (*Evaluation of adhesives for structural wood products - exterior exposure*) e a CSA 112.10 (2007) (*Evaluation of adhesives for structural wood products - limited moisture exposure*).

A norma CSA 112.9 apresenta os procedimentos para avaliação da resistência dos adesivos expostos em ambientes externos, e a norma CSA 112.10 apresenta os procedimentos para avaliação de adesivos expostos em ambientes com o teor de umidade controlados, por meio dos ensaios de delaminação das linhas de cola, cisalhamento das linhas de cola e de fluência. Porém a norma CSA 112.10 permite apenas a avaliação de determinadas espécies de coníferas, sendo elas a *Acer saccharum*, *Acer nigrum*, *Pinus contorta* var. *latifolia*, *Picea mariana* e a *Pseudotsunga menziesii*.

Segundo as duas normas citadas, para a análise da resistência ao cisalhamento das linhas de cola, o adesivo deve ser aprovado em três ensaios diferentes, onde apenas há distinção no método de preparação das amostras.

No primeiro método, os corpos de prova são colocados em um ambiente com umidade relativa do ar de 65% e temperatura de 20 °C até seu peso permanecer constante.

No segundo método, as amostras devem ficar submersas em água a 20 °C dentro de uma autoclave com aplicação de vácuo de 75 kPa por 30 minutos, seguido da aplicação de uma pressão de 540 kPa por 2 horas.

No terceiro método as amostras devem ficar submersas em água fervente por 4 horas, com posterior secagem em estufa a 60 °C por 19 horas, sendo então congeladas em uma temperatura abaixo de -30 °C por 4 horas. Essa metodologia rigorosa de preparação dos corpos de prova se deve a grande variação de temperatura entre as estações do ano no Canadá.

Após a preparação de cada amostra deve ser realizado o ensaio de cisalhamento na linha de cola, e esse ciclo é repetido mais sete vezes para adesivos expostos em ambiente exterior, e duas vezes para ambientes interiores.

A única diferença entre as duas normas se dá no momento do ensaio de cisalhamento das amostras do segundo método, onde na CSA 112.9 a amostra deve estar úmida, enquanto na CSA 112.10 a amostra deve estar seca.

Para a análise da delaminação, as duas normas também possuem o mesmo procedimento, nos quais os corpos de prova devem ser submersos em água a 22 ± 2 °C, e são submetidos a um vácuo de 75 kPa por 2 horas e a uma pressão de 540 kPa por mais 2 horas. Procedimento este que deve ser realizado novamente. Após essa etapa, os corpos de prova são levados para estufa com temperatura de 28 ± 2 °C, com circulação de ar, por 88 horas.

Esse procedimento deve ser realizado mais duas vezes, totalizando 12 dias de ensaio, para então se determinar a porcentagem de delaminação das amostras.

Segundo a norma CSA 112.9 (2004), a delaminação máxima permitida para amostras produzidas com coníferas é de 1% e para folhosas é de 1,6%. Para a norma CSA 112.10 (2007), a delaminação máxima permitida para coníferas e folhosas é de 1%.

3.5.3 Normas europeias: EN 14080 e EN 408

No continente Europeu, a *European Standard* – EN avalia se os produtos, processos ou serviços atendem aos requisitos mínimos de adequação para uma determinada finalidade.

Para o controle de qualidade de elementos de MLC, as empresas utilizam os procedimentos descritos nas normativas EN 14080 (2013) (*Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements*) e EN 408 (2011) (*Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*).

A normativa EN 14080 (2013) descreve a metodologia de realização dos ensaios de delaminação e de resistência do cisalhamento das linhas de cola de amostras retiradas dos elementos estruturais.

Na análise do cisalhamento na linha de cola, é possível avaliar apenas uma ou todas as linhas de cola, e o procedimento consiste na aplicação de um carregamento uniforme no corpo de prova, na região de colagem, até que ocorra a ruptura da linha de cola. Após o ensaio, deve-se quantificar a porcentagem de ruptura na madeira.

Para a análise da porcentagem de delaminação das linhas de cola dos corpos de prova, a norma EN 14080 dispõe de três métodos distintos (Métodos A, B e C), cada um referente à uma classe de serviço para exposição do adesivo que será utilizado, de acordo com ambiente onde os elementos estruturais serão expostos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de serviço dos elementos estruturais de MLC.

Classe de serviço	Ambiente de exposição	Teor de Umidade	Tipo de Adesivo
1	Interno	65	I e II
2	Externo protegido	85	I
3	Interno e externo	> 85	I

Fonte: Adaptado da EN 301 (2018).

Os três procedimentos são semelhantes, onde as amostras devem ser condicionadas em uma autoclave e, submersas em água, a uma temperatura de 10 °C a 20 °C, com posterior aplicação de um ciclo de vácuo de 70 kPa a 85 kPa, seguido de uma pressão de 500 kPa a 600 kPa. Após ao término desse ciclo, as amostras devem ser condicionadas em estufa com velocidade do ar entre 2 m/s e 3m/s. A diferença entre os procedimentos são os tempos de aplicação de vácuo e pressão, a temperatura de secagem em estufa e a umidade relativa do ar no interior da estufa.

O Método A é destinado a aprovação do adesivo do tipo I e II e exposição em ambiente interno. Nele as amostras são submetidas a um vácuo por 5 minutos e à pressão por 1 hora. Esse ciclo de vácuo-pressão deve ser repetido mais uma vez antes da abertura da autoclave. Na estufa, as amostras são confinadas durante 22 horas em uma temperatura de 60°C a 70°C com uma umidade relativa menor do que 15%.

O Método B é destinado a aprovação do adesivo do tipo I e exposição em ambiente externo protegido. As amostras devem ser expostas a um vácuo por 30 minutos e, posteriormente, à pressão durante 2 horas. Na estufa, as amostras são secas a uma temperatura

de 65°C a 75°C e uma umidade relativa de 10%, até que a massa da amostra atinja valor compreendido entre 100% e 110% da massa inicial.

O Método C é destinado a aprovação do adesivo do tipo I, para exposição em ambientes interno, externo protegido e externo. Os corpos de prova são submetidos a um vácuo por 30 minutos e à pressão por 2 horas. O ciclo de vácuo-pressão deve ser repetido uma vez, totalizando 5 horas de ensaio. Em seguida, o material é seco em estufa por um período de 90 horas a uma temperatura de 25°C a 35°C e umidade relativa do ar de 25% a 35%.

A delaminação máxima permitida deve atender aos requisitos fornecidos pela Tabela 2. Um ciclo de teste adicional pode ser realizado no método A ou B se a delaminação total, de acordo com a tabela, excede o valor permitido.

Tabela 2 – Porcentagens máximas permitidas para delaminação da linha de cola de acordo com o número de ciclos de vácuo-pressão realizados.

Tipo do material	Método	Número de ciclos		
		1	2	3
MLC com lamelas de espessuras menores que 60 mm;	A	-	5%	10%
	B	4%	8%	-
MLC com conexões <i>finger joints</i> .	C	10%	-	-

Fonte: Adaptado da EN 14080 (2013).

Para determinação da resistência de elementos estruturais com emendas dentadas, utiliza-se os procedimentos da norma EN 408 (2011), a qual descreve os procedimentos para determinação da resistência (MOR) da emenda dentada, e do módulo de elasticidade (MOE) na flexão das vigas estruturais de MLC.

3.6 NORMA BRASILEIRA DE CONTROLE DA QUALIDADE DA MLC

Como citado anteriormente, no Brasil não existia uma norma específica para o controle da qualidade de elementos de MLC, porém a NBR 7190 (1997) passou por um processo de revisão na ABNT e resultou em uma compilação de 6 diferentes métodos de ensaios, além do documento principal (NBR 7190-1), os quais possibilitam a avaliação de elementos de madeira maciços e industrializados de uma forma mais representativa. Os métodos e ensaios são:

- ABNT NBR 7190-1 (*Projeto de estruturas de madeira - Critérios de dimensionamento*): estabelece os requisitos gerais de projeto e execução de estruturas de madeira, apresenta

os critérios de cálculo para o dimensionamento e a verificação de segurança de elementos estruturais de madeira sólida, madeira lamelada colada, painéis estruturais e produtos à base de madeira, com elementos estruturais unidos por adesivos ou conectores mecânicos;

- ABNT NBR 7190-2 (*Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira*): apresenta recomendações para a classificação mecânica e visual de elementos de madeira;
- ABNT NBR 7190-3 (*Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*): apresenta metodologias para determinação das propriedades necessárias para o projeto de estruturas;
- ABNT NBR 7190-4 (*Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais*): apresenta as metodologias para determinação da resistência e rigidez de peças estruturais de madeira serrada, baseado nas normas ISO 13910 (2014) e ASTM D198 (2014);
- ABNT NBR 7190-5 (*Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos*): indica princípios gerais para a determinação da resistência e da deformação de ligações mecânicas, baseado na norma ISO 6891 (1983);
- ABNT NBR 7190-6 (*Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural*): que tem como objetivo atender as indústrias nacionais produtoras de MLC para avaliar a qualidade final do produto, baseada nos procedimentos descritos nas normas europeias EN 14080 (2013) e EN 408 (2011);
- ABNT NBR 7190-7 (*Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamela colada cruzada*): propõe os procedimentos para a avaliação da qualidade final de elementos do tipo CLT e baseia-se nas normas EN 16351 (2015), EN 408 (2011) e EN 789 (2004).

Os referidos métodos de ensaio brasileiros são utilizados para verificar o desempenho estrutural de elementos maciços e industrializados, como também para caracterizar corpos de prova isentos de defeitos.

Esses métodos de ensaio também possibilitam a análise da qualidade de colagem de elementos de MLC e CLT, além de permitir a classificação visual a partir da avaliação dos defeitos próprios e de secagem de diferentes tipos de madeiras maciças e de produtos derivados.

No presente trabalho são utilizadas as normas ABNT NBR 7190-2 para realizar a classificação visual das lamelas utilizadas na produção dos elementos de MLC, a NBR 7190-3 para a caracterização das espécies de madeira utilizadas e a NBR 7190-6 para avaliar a qualidade de colagem dos elementos de MLC produzidos.

3.6.1 Norma ABNT NBR 7190-2

A ABNT NBR 7190-2 (*Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira*) estabelece os critérios para classificação visual e mecânica de peças de madeira serrada de coníferas e folhosas de florestas plantadas, destinadas a uso estrutural, como a fabricação de elementos de MLC.

Os defeitos visuais considerados pela ABNT NBR 7190-2 (2022) são: presença de medula, nós, inclinação excessiva das fibras, fissuras passantes e não passantes, encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento, esmoado, ataques biológicos, danos mecânicos ou bolsas de resina. Em função dos defeitos presentes e de suas severidades, a norma recomenda a divisão das lamelas em três classes (Classe 1, Classe 2 e Classe 3).

As Tabelas 3 e 4 apresentam os critérios de classificação visual das lamelas de coníferas (*Pinus spp*) e de folhosas (*Eucalyptus spp*), respectivamente.

Tabela 3 – Critérios de classificação visual para coníferas.

Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós na face	$\leq 1/4$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Nós na borda	$\leq 1/5$	$\leq 1/4$	$\leq 1/3$
Inclinação das fibras (mm/mm)	$\leq 1:9$	$\leq 1:6$	$\leq 1:3$
Fissuras não passantes	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0 m e nem $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça.		
Fissuras passantes (m)	Somente se permitem fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior que a largura da peça.		
Encurvamento (mm)	Menor que 8 mm para cada 3 m de comprimento.		
Arqueamento (mm)	Menor que 3 mm para cada 2 m de comprimento.		
Torcimento (mm/m)	Menor que 5 mm para cada 1 m de comprimento.		
Encanoamento (mm)	Sem restrições.		
Esmoado (mm/mm)	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça, sem restrições para o comprimento.		
Ataques biológicos	Não se admitem zonas atacados por fungos causadores de podridão; admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos e orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm.		
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsa de resina e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar.		

Fonte: ABNT NBR 7190-2 (2022).

Tabela 4 – Critérios de classificação visual para folhosas.

Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós na face	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Nós na borda	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Inclinação das fibras (mm/mm)	1:12	1:9	1:6
Fissuras não passantes	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0 m e nem $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça.		
Fissuras passantes (m)	Somente se permitem fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior que a largura da peça.		
Encurvamento (mm)	Menor que 8 mm para cada 3 m de comprimento.		
Arqueamento (mm)	Menor que 3 mm para cada 2 m de comprimento.		
Torcimento (mm/m)	Menor que 5 mm para cada 1 m de comprimento.		
Encanoamento (mm)	Sem restrições.		
Esmoadado (mm/mm)	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça, sem restrições para o comprimento.		
Ataques biológicos	Não se admitem zonas atacados por fungos causadores de podridão; se admitem zonas atacadas por fungos cromógenos e orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm.		
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsa de resina e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar.		

Fonte: ABNT NBR 7190-2 (2022).

Essa norma atribui uma classe de resistência a cada uma das peças que compõe o lote a ser utilizado, e se aplica a peças cujas dimensões máximas da seção transversal não seja maior de 60 mm para a menor dimensão e 300 mm para a maior dimensão.

O procedimento consiste em realizar a inspeção visual das duas faces e das duas bordas de cada lamela empregada na produção dos elementos estruturais, desconsiderando os defeitos que ocorrem exclusivamente nos topos e bordas das peças.

Para a classificação mecânica, a norma também divide as lamelas em Classe 1, 2 e 3, de acordo com valores referenciais de densidade aparente e módulo de elasticidade médio (E_m), resistências à flexão ($f_{m,k}$), à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) e ao cisalhamento ($f_{v,k}$).

As Tabelas 5 e 6 apresentam os critérios para classificação mecânica das lamelas de coníferas e de folhosas, respectivamente.

Tabela 5 – Critérios de classificação mecânica para coníferas.

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Densidade (kg/m^3)	≥ 500	≥ 400	≥ 350
E_m (MPa)	≥ 11000	≥ 8000	≥ 5000
$f_{m,k}$ (MPa)	35	27	14
$f_{c0,k}$ (MPa)	22	18	14
$f_{v,k}$ (MPa)	6	3,5	2,5

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-2 (2022).

Tabela 6 – Critérios de classificação mecânica para folhosas.

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Densidade (kg/m^3)	≥ 700	≥ 600	≥ 500
E_m (MPa)	≥ 14000	≥ 13000	≥ 11000
$f_{m,k}$ (MPa)	50	40	30
$f_{c0,k}$ (MPa)	35	30	25
$f_{v,k}$ (MPa)	4	4	4

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-2 (2022).

Para a determinação da classe de resistência de cada uma das peças de madeira que compõe o lote deve ser adotada a menor das duas classes (visual e mecânica) atribuídas.

3.6.2 Norma ABNT NBR 7190-6

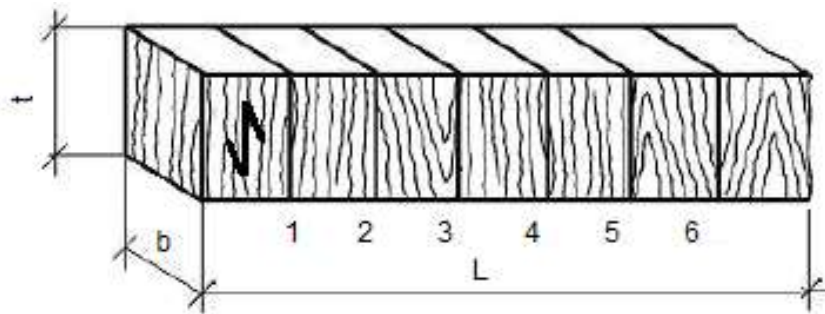
A norma ABNT NBR 7190-6 (*Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural*) apresenta os procedimentos de ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento das linhas de cola e da porcentagem de delaminação, além de testes para tração em emendas dentadas e medição da quantidade de adesivo espalhado.

(a) Resistência ao cisalhamento das linhas de cola

Na avaliação da resistência ao cisalhamento das linhas de cola, os corpos de prova devem fazer parte da seção transversal do elemento de MLC, conforme esquema da Figura 11.

O comprimento L do corpo de prova corresponde à altura da seção transversal do elemento. A largura b do elemento colado determina o número de amostras a ser extraída do elemento estrutural, conforme indicado na Tabela 7.

Figura 11 – Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento da linha de cola.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-6 (2022).

Tabela 7 – Resumo dos limites de delaminação para cada ambiente de exposição.

Largura do elemento (mm)	≤ 100	$> 100 \text{ e } \leq 160$	> 160
Número de corpos de prova	1	2	3

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-6 (2022).

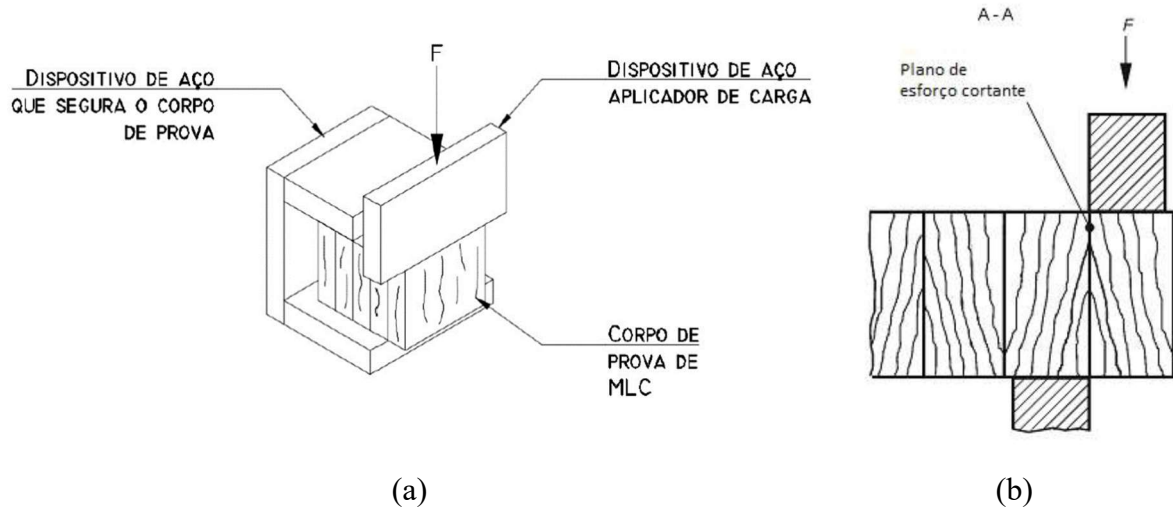
Quando se preparam dois ou mais corpos de prova de uma seção transversal, como consequência da largura do elemento estrutural, se considera um único corpo de prova para fins de amostragem. A espessura t do corpo de prova deve ser igual a 100 mm.

O número de linhas de cola a ensaiar em um corpo de prova deve ser de no mínimo 3 da parte superior, 3 da parte central e 3 da parte inferior. Se o número de linhas de cola do corpo de prova for menor que 10 deve-se ensaiar todas as linhas de cola.

O dispositivo necessário para o ensaio consiste em uma peça de aço que transmite a força ao corpo de prova e deve estar articulada de tal forma que a força atue sobre a superfície transversal do corpo de prova com distribuição uniforme de pressão em toda a largura da peça, conforme o esquema do dispositivo de ensaio apresentado na Figura 12a. As superfícies onde se aplicarão as forças devem estar paralelas entre si e perpendiculares à direção das fibras, conforme mostrado na Figura 12b.

No ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola, a altura (t) e a largura (b) da superfície colada que se submeterá ao cisalhamento deve ser medida com exatidão de 0,1 mm. Um mínimo de 2 medições deve ser realizado em cada extremo da superfície para a determinação do valor médio. A máquina de ensaio deve ser apta a medir as forças de ruptura e aplicar a força a uma velocidade constante, de maneira que a ruptura na seção transversal se alcance em um tempo mínimo de 20 segundos.

Figura 12 – Dispositivo para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-6 (2022).

Ao chegar no ponto de falha do corpo de prova, a força máxima ($F_{v0,max}$) deve ser registrada. A resistência ao cisalhamento (f_{v0}) para a linha de cola é calculada pela Equação (1):

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b \times t} \quad [MPa] \quad (1)$$

Onde:

$F_{v,max}$: é a força máxima cisalhante aplicada na lamela de ruptura, em N;

b : é a largura do corpo de prova, em mm;

t : é a altura do corpo de prova, em mm.

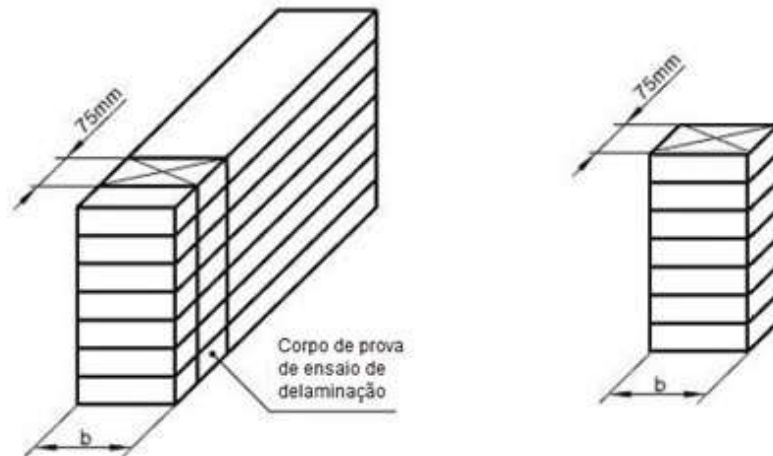
Para se estimar a área de ruptura em relação ao total da área submetida ao cisalhamento, as uniões podem ser separadas empregando-se um formão. A porcentagem de ruptura deve ser determinada em relação a área total da madeira e de acordo com o modo de ruptura.

Geralmente a porcentagem de ruptura na região de colagem, após os ensaios de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, tem sido avaliada de forma visual.

(b) Delaminação das linhas de cola

Para os ensaios de delaminação, as amostras devem ser extraídas dos elementos de MLC, com comprimento de $75 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ e teor de umidade na faixa de 10 a 14%. Estas amostras devem ser representativas da produção e devem extraídas da seção transversal completa do elemento a partir de corte na direção perpendicular à direção das fibras (Figura 13).

Figura 13 – Corpo de prova para o ensaio de delaminação.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-6 (2022).

Se a largura do elemento estrutural for maior que $300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, pode-se tomar dois ou mais corpos de prova com uma largura mínima de $150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ cada um. Se a altura for maior que $600 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, pode-se tomar dois ou mais corpos de prova com uma altura mínima de $300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$.

Os procedimentos para o ensaio de delaminação das linhas de cola para adesivos de uso externo e externo protegido são baseados no Método B da EN 14080 (2013).

As amostras devem ser pesadas, e posteriormente condicionadas em uma autoclave, submersas em água, a uma temperatura entre 10°C e 20°C , sendo aplicado um vácuo entre 70 kPa e 85 kPa durante 30 minutos, seguido da aplicação de uma pressão entre 500 kPa e 600 kPa durante 2 horas.

Após o ciclo de vácuo-pressão, as amostras devem permanecer na estufa (ou câmara climatizadora) por um período entre 10 h e 15 h, com uma temperatura entre 65°C e 75°C , fluxo de ar entre 2 m/s e 3 m/s e umidade relativa entre 8% e 10% até que os corpos de prova atinjam valor de massa compreendido entre 100% e 110% da massa inicial.

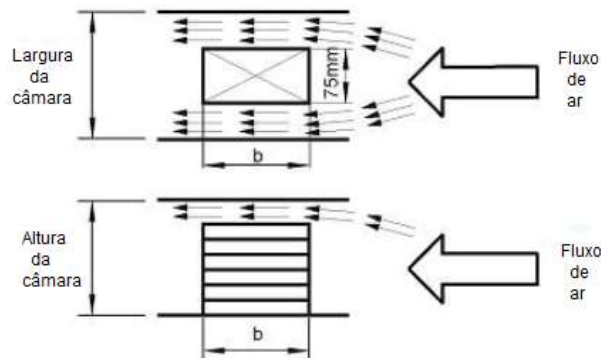
Durante a secagem, os corpos de prova devem estar distanciados 50 mm entre si, no mínimo, e as seções transversais cortadas devem estar posicionadas em forma paralela ao fluxo de ar (Figura 14).

O procedimento para adesivo de uso interno é baseado no Método C da EN 14080 (2013). O processo inicial é o mesmo da metodologia anterior, porém o ciclo de vácuo-pressão deve ser repetido, de modo que o processo completo tenha uma duração de 5 horas.

Porém, na etapa de secagem, as amostras devem permanecer na estufa (ou câmara climatizadora) por um período de 90 h, com uma temperatura regulada entre 25°C e 35°C ,

fluxo de ar entre 2 m/s e 3 m/s e umidade relativa entre 25% e 35% até que os corpos de prova atinjam valor de massa compreendido entre 100% e 110% da massa inicial. Durante a secagem, os corpos de prova devem estar posicionados da mesma forma apresentada no procedimento para adesivo de uso externo (Figura 14).

Figura 14 – Forma de disposição dos corpos de prova de MLC na estufa.

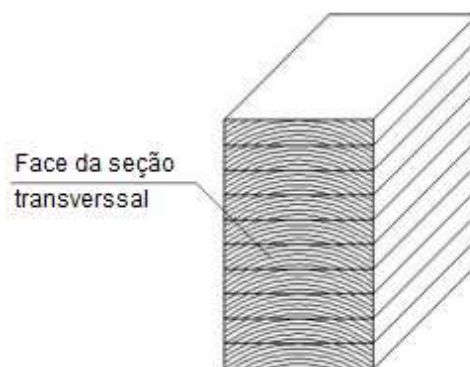


Fonte: ABNT NBR 7190-6 (2022).

Depois de, no máximo, 1 hora da finalização do procedimento de secagem, deve ser medida as aberturas nas linhas de cola nas duas faces da seção transversal dos corpos de prova.

Nos ensaios de delaminação, a avaliação da abertura linha de cola é feita através da medida das linhas de cola das face frontal e posterior da amostra retirada do elemento de MLC, sem considerar as delaminações das linhas de cola laterais, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Seção transversal a ser considerada na avaliação da delaminação.



Fonte: ABNT NBR 7190-6 (2022).

Assim, a abertura da linha de cola a ser considerada na delaminação é sempre com relação ao comprimento total (somatória) das linhas de cola (frontal e posterior) medidos antes dos ensaios de vácuo e pressão na autoclave.

Para analisar os resultados de delaminação, registram-se as uniões debilitadas. Não devem ser consideradas as rupturas produzidas na madeira e devem ser ignoradas as delaminações isoladas menores que 2,5 mm de largura e situadas a mais de 5 mm da delaminação mais próxima.

O percentual de delaminação total (Dt) de cada corpo de prova é obtido pela Equação (2).

$$Dt = \frac{La}{Lt} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Onde:

La : é a somatória das larguras das linhas delaminadas das faces da seção transversal, em mm;

Lt : é a somatória das larguras de todas as linhas de cola das faces da seção transversal, em mm.

E a maior porcentagem de delaminação (Dt_{max}) permitido para uma linha de cola é calculada pela Equação (3).

$$Dt_{max} = \frac{La_{max}}{Lj_{max}} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Onde:

La_{max} : é a maior largura da junta delaminada sobre as faces da seção transversal, em mm;

Lj_{max} : é a largura da junta que apresenta maior delaminação, em mm.

A porcentagem de delaminação permitida para ambiente externo é de 4% para madeiras do tipo coníferas e de 6% para folhosas (dicotiledôneas). Para ambiente externo protegido, a porcentagem permitida é de 6% para coníferas e de 8% para folhosas. Para ambientes internos, a porcentagem de delaminação é de 8% no caso de coníferas e de 10% no caso das folhosas.

Se a delaminação total observada após o primeiro ciclo exceder esses valores, de acordo com o uso e a espécie utilizada, o ciclo inteiro deve ser realizado novamente com novos corpos de prova. A delaminação observada e registrada no final do segundo ciclo não deve exceder 10% para ambas as espécies.

Um resumo dos métodos recomendados pela norma brasileira e por cada uma das normas estrangeiras citadas para a obtenção da porcentagem de delaminação em amostras de elementos de MLC é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo dos métodos de delaminação.

Norma	Ambiente de exposição	Delaminação máxima (%)	
		Coníferas	Folhosas
NBR 7190-6 (Externo)	Externo	4,9	6,0
NBR 7190-6 (Ext. protegido)	Externo	6,0	8,0
NBR 7190-6 (Interno)	Interno	8,0	10,0
ASTM D2559	Externo	1,0	1,6
CSA 112.09	Externo	1,0	1,6
CSA 112.10	Interno	1,0	1,0
EN 14080 (Método A)	Interno	5,0	5,0
EN 14080 (Método B)	Interno	4,0	4,0
EN 14080 (Método C)	Interno e externo	10,0	10,0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-6 (2022), ASTM D2559 (2004), CSA 112.09 (2004), CSA 112.10 (2007) e EN 14080 (2013).

3.7 ESTUDOS COM MLC REALIZADOS NO BRASIL

A maioria dos estudos nacionais, relativos aos elementos de MLC, se referem aos aspectos teóricos e normativos de dimensionamento do elemento (FIORELLI *et al.*, 2004; CHAHUD *et al.*, 2018; GOMES, 2018; LUZ *et al.*, 2020; ROSA *et al.* 2020), avaliação da resposta numérica ou experimental do elemento (MIOTTO, 2009, FIORELLI e DIAS, 2011) com foco no aumento de sua resistência, seja pela escolha da melhor combinação madeira-adesivo ou pelo uso de algum tipo de reforço com fibra (por exemplo a fibra de vidro).

Mas recentemente, com a proposição da Norma Brasileira de Madeiras e de Estruturas de Madeiras ABNT NBR 7190 (2022), estudos com enfoque no controle da qualidade de colagem de elementos de MLC têm sido desenvolvidos com maior frequência, como também estudos envolvendo a região adesiva a partir de técnicas de microscopia.

Na sequência são apresentados, em ordem cronológica, alguns dos estudos mais recentes desenvolvidos no país, com foco na otimização dos parâmetros de colagem e, principalmente, na resposta da qualidade de colagem de elementos de MLC.

Serrano (2013), realizou ensaios de cisalhamento da linha de cola em corpos de prova, com configuração proposta pela ABNT NBR 7190 (1997), para avaliação da interação entre madeiras de *Eucalyptus grandis* e os adesivos Cascophen e Jowapur. Utilizou na colagem entre

as peças de madeira uma gramatura de 300 g/m² com aplicação do adesivo nas duas faces opostas das peças de madeira. Também considerou diferentes pressões de colagem (0,8 MPa, 1,2 MPa e 1,5 MPa), além de três diferentes tipos de acabamentos para a superfície das lamelas, os quais foram obtidos por fresamento periférico discordante. A autora observou que a eficiência adesiva não variou significativamente entre os adesivos, pressão de colagem e acabamento de superfície.

Segundinho *et al.* (2015a) realizaram ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento da linha de cola em elementos de MLC confeccionados com três tipos de madeiras (*Tectona grandis*, *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus spp*), sem tratamento preservante, coladas com adesivo bicomponente à base de melanina-ureia-formaldeído (MUF 1242/2542). O adesivo foi utilizado na proporção 100 partes/peso do adesivo e 20 partes/peso do endurecedor a partir de uma gramatura de adesivo de 250 g/m² aplicada nas duas faces das lamelas. Os ensaios de delaminação foram realizados com base nas recomendações da AITC T110 (2007) e os ensaios de cisalhamento das linhas de cola foram realizados a partir de corpos de prova de cisalhamento com corte duplo.

Segundinho *et al.* (2015b) também realizaram estudos sobre elementos de MLC produzidos com madeira de *Acacia mangium* utilizando os adesivos melamina-ureia-formaldeído bi-componente e o poliuretano líquido monocomponente. O estudo foi realizado utilizando a normativa ASTM D905 (2009) para os ensaios de cisalhamento da linha de cola, e a AITC A190 (2017) para os ensaios de delaminação. Os autores concluíram que a madeira de *Acacia mangium* pode ser utilizada na fabricação de elementos de MLC, no qual o adesivo melamina-ureia-formaldeído mostrou-se mais viável, apresentando melhores resultados para uso em ambientes secos e saturados.

Calil Neto *et al.* (2016) realizaram testes de delaminação e de resistência ao cisalhamento da linha de cola em elementos de MLC, confeccionados com quatro tipos de madeira (*Pinus*, *Teca*, *Lyptus* e *Paricá*), com e sem tratamento preservante (com CCA e CCB), e três diferentes tipos de adesivos (poliuretano HB S309, resorcinol RS 216-M e MUF 1242/2542). Os ensaios de delaminação foram realizados com base nas normas canadense CSA 0112.10 (2007) e americana ANSI/AITC A190 (2017). Na colagem das lamelas de madeira foi considerada uma gramatura de adesivo de 200 g/m². As melhores combinações madeira-adesivo foram verificadas para as madeiras de *Pinus* e *Paricá* com qualquer tipo de adesivo, independente do uso ou não de tratamento preservante.

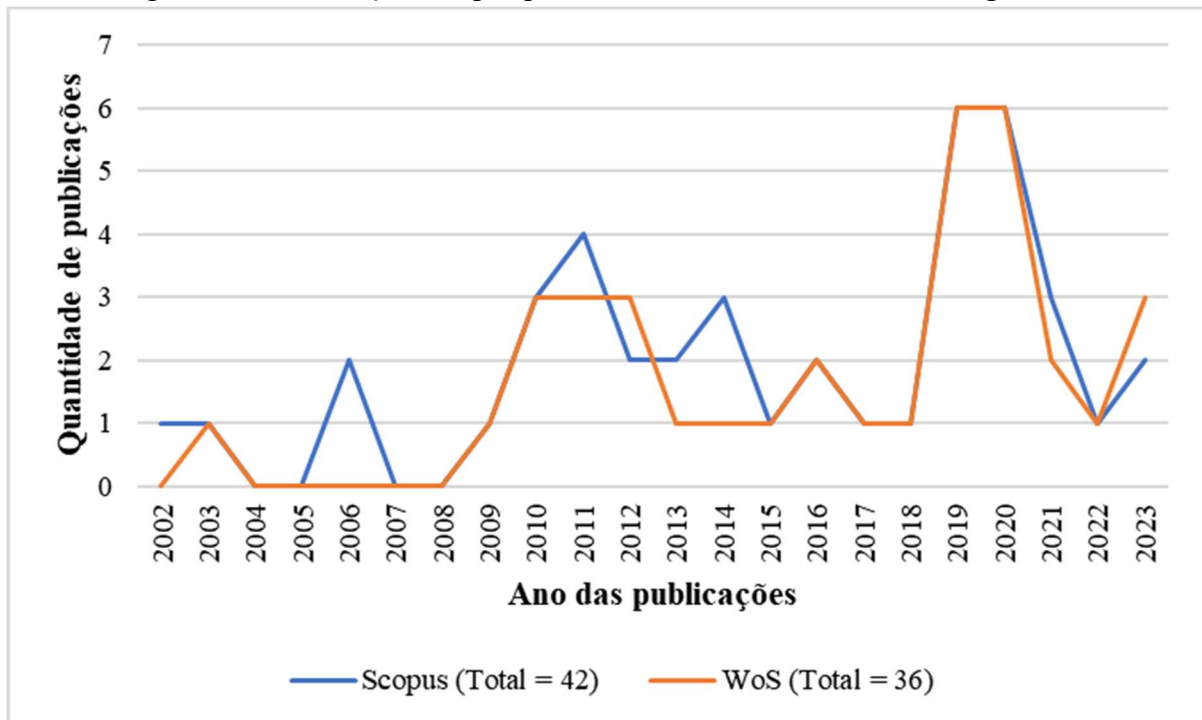
Araújo e Molina (2017) avaliaram a influência do teor de umidade de colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (8%, 10%, 12%, 14% e 16%) na resistência ao cisalhamento da linha de cola e nos modos de ruptura em corpos de prova de cisalhamento com corte duplo. Na colagem dos corpos de prova foi utilizado o adesivo poliuretano vegetal Imperveg. A qualidade pós-colagem também foi avaliada para os corpos de prova de cisalhamento após imersos em água por períodos de 12, 24, 36 e 48 horas. Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento da linha de cola foi pouco influenciada pelo aumento da umidade de colagem para os tempos considerados, sendo que os modos de ruptura predominantes ocorreram de forma mista, ou seja, na linha de cola e na madeira. Os corpos de prova imersos em água não apresentaram diferenças significativas de resistência ao cisalhamento da linha de cola.

Cavalheiro (2018), avaliou a partir de diferentes técnicas de microscopia a penetração do adesivo em vigas de MLC confeccionadas por diferentes indústrias com diferentes tipos de madeiras e adesivos (Purbond HB S390, Jowapur 686.60, MUF e Cascophen). A autora constatou que os adesivos Purbond HB S390 e Jowapur 686.60 apresentaram bolhas de ar na linha de cola após a cura, além de cristais e evidências de tensões residuais. Os adesivos MUF e Cascophen não apresentaram evidências de nenhum desses elementos. Os resultados de microscopia mostraram que a penetração do adesivo está relacionada à estrutura anatômica da madeira (vasos, lumens e traqueídeos) e, principalmente, a densidade da madeira.

Bianchi (2020), realizou ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas em cola considerando madeiras de Pinus e Eucalipto tratadas com CCA e *in natura*, coladas com os adesivos Cascophen RS 216-M, Poliuretano Jowapur 686.60 (monocomponente) e Poliuretano (bicomponente) da Kehl. Os melhores resultados foram obtidos para a combinação Eucalipto-Cascophen, tendo em vista a baixa densidade da madeira utilizada. O tratamento preservante com CCA praticamente não influenciou a colagem.

Um levantamento bibliográfico, realizado na base de dados Scopus e Web of Science, sobre o número de publicações em revistas científicas, por pesquisadores brasileiros, com o termo “*glulam*” (madeira lamelada colada em inglês) é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Publicações de pesquisadores brasileiros com o termo “*glulam*”.



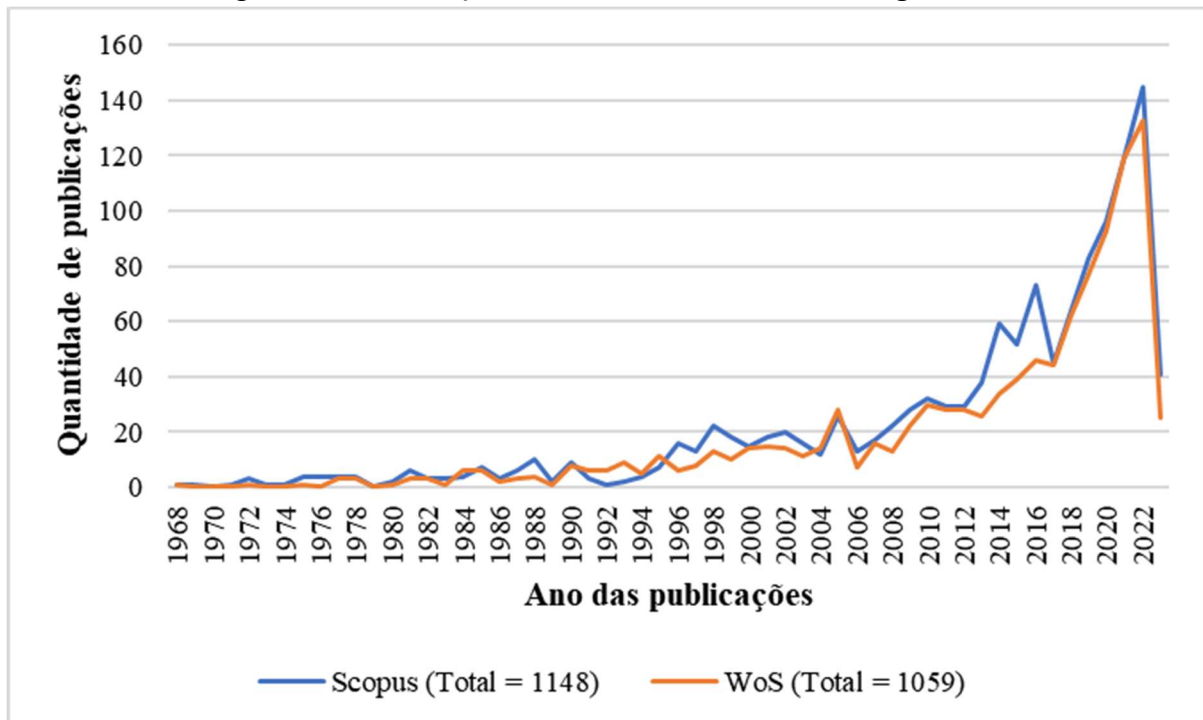
Fonte: Scopus e Web of Science (2023).

Segundo a Scopus (2023), o primeiro trabalho sobre madeira lamelada colada publicado por pesquisadores brasileiros foi de Batista *et al.* (2002), no qual os autores avaliaram a resistência à tração de emendas do tipo *finger joint* horizontal e vertical em peças de MLC de tamanhos estruturais produzidos com Pinus, e a sua eficiência em relação à madeira serrada.

A Figura 17 apresenta o mesmo levantamento bibliográfico, porém levando em consideração as publicações com o tema “*glulam*” realizadas por pesquisadores do mundo todo.

Nota-se que estudos sobre a madeira lamelada colada já eram realizados em outros países desde o final dos anos 60, porém é possível observar que a partir de 2010 houve um aumento significativo nas publicações sobre esse tema, sendo esse assunto mais pesquisado na China (269 publicações), Japão (113 publicações) e Estados Unidos (105 publicações).

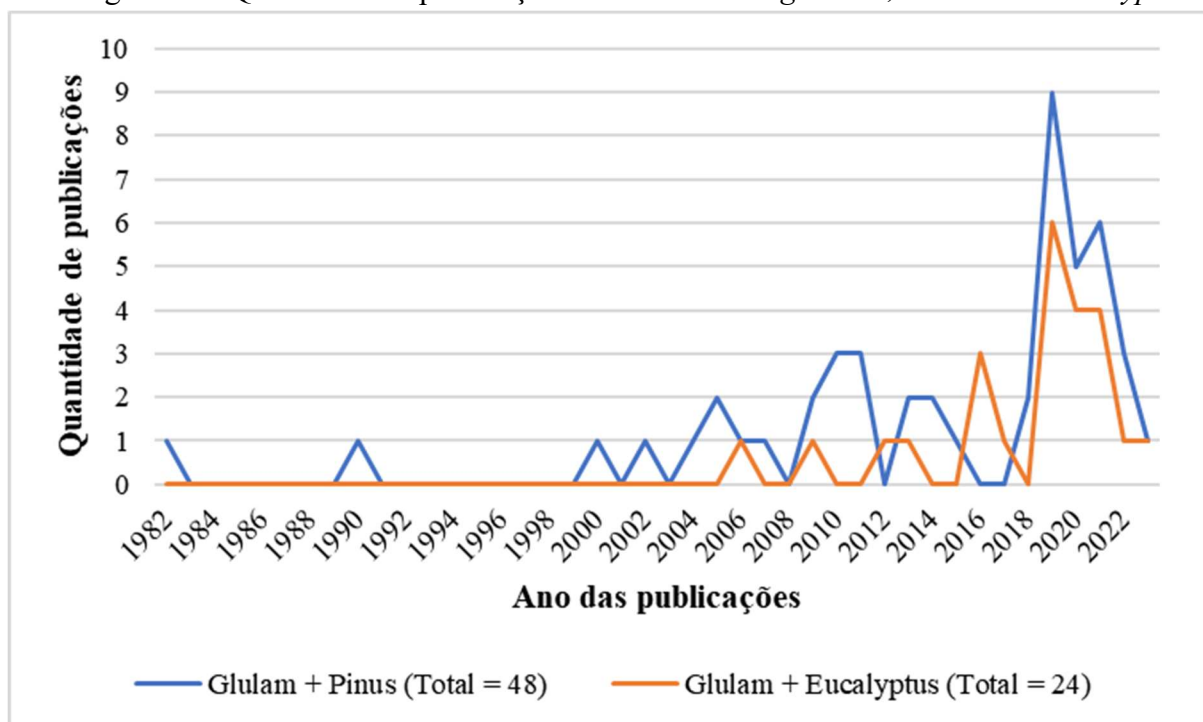
Figura 17 – Publicações internacionais com o termo “glulam”.



Fonte: Scopus e Web of Science (2023).

A Figura 18 apresenta o levantamento sobre a quantidade de publicações científicas no mundo, com os temas MLC de Eucalipto e MLC de Pinus, realizado na base de dados Scopus.

Figura 18 – Quantidade de publicações com os termos “glulam”, “Pinus” e “Eucalyptus”.



Fonte: Scopus (2023).

Ao realizar uma pesquisa com os termos MLC e *Toona ciliata* (Cedro australiano), a base de dados Scopus retornou como resultado apenas o estudo desenvolvido por Faria *et al.* (2019), no qual os autores avaliaram a influência do número de lamelas no comportamento mecânico de elementos de MLC produzidos com madeira de *Toona ciliata* e adesivo poliuretano vegetal.

Para a pesquisa de elementos de MLC produzidos com *Acrocarpus fraxinifolius* (Cedro indiano) a base de dados Scopus não encontrou nenhum estudo correspondente. Também não foram encontrados estudos relacionados a influência do acabamento das lamelas de madeira na qualidade de colagem dos elementos de MLC.

Segundo dados da base Scopus (2023), foram encontrados 324 artigos com termo *Toona ciliata*, porém a grande maioria relacionados a agricultura, ciências biológicas, entre outros, sendo o Brasil e a China os países que mais desenvolvem pesquisas com essa madeira, com 105 e 95 publicações cada, respectivamente, seguidos pela Índia com 51 publicações e Austrália com 29.

Para o termo *Acrocarpus fraxinifolius* foram encontrados 54 artigos, também relacionadas, em maior parte, a agricultura, ciências biológicas e uso farmacêutico, sendo o Brasil (16) e a Índia (11) os países com maior quantidade de publicações, seguidos pelo Egito com 8 publicações e México com 7, entre outros países (12).

3.8 ESTUDOS COM FATORES QUE AFETAM A COLAGEM

Os estudos realizados com foco nos parâmetros a serem observados para a melhoria da qualidade de colagem estão apresentados na sequência, também em ordem cronológica.

Segundo Hse e Kuo (1988), a quantidade de extrativos existentes nas faces da madeira perturba a adesão e provoca alterações nas forças coesivas dos adesivos. Consequentemente, a quantidade de extrativos provoca também uma diminuição na resistência ao cisalhamento da linha de cola, dependendo da quantidade de extrativos presentes na madeira.

De acordo com Vick (1999), madeiras mais densas (entre 700 kg/m³ e 800 kg/m³) apresentam maior solicitação na linha de cola em elementos de MLC e, consequentemente, a porcentagem de falha no adesivo também é aumentada. Além disso, a utilização de madeira com densidade superior a esta faixa provoca uma redução da capacidade do adesivo de resistir a esforços e, consequentemente, uma tendência de diminuir a resistência da ligação colada. O autor cita ainda que madeiras de alta densidade requerem pressões acima de 1,7 MPa e que a porosidade é uma propriedade da madeira responsável por aumentar a capacidade aderente, já

que influencia na penetração dos adesivos. Até uma faixa de valores de densidade entre 700 kg/m³ e 800 kg/m³ a resistência da linha adesiva tende a aumentar.

Properzi *et al.* (2003) afirmam que, tanto a madeira úmida quanto a madeira seca, são problemáticas para a colagem. As faixas de umidade de melhor adesão na madeira estão entre 6% e 14%, sendo que os adesivos mais tradicionais necessitam de umidades entre 12% e 14%.

De acordo com Frihart (2004), o estudo do processo de colagem, para melhor compreensão da interação madeira-adesivo, pode ser dividido nas escalas milimétricas, micrométrica e nanométricas. A escala milimétrica é usada para avaliações típicas, enquanto a escala micrométrica refere-se ao tamanho transversal de células, que são as unidades básicas estruturais da madeira. A escala nanométrica mostra a interação do adesivo com a madeira na escala de fibrilas de celulose e os domínios de hemiceluloses e lignina.

Burdurlu *et al.* (2007) cita que madeiras com superfícies lisas produzem uniões mais resistentes do que madeiras com superfícies rugosas, pois a excessiva rugosidade facilita a captura de bolhas de ar pelo adesivo causando sua descontinuidade.

Segundo López-Suevos e Richter (2009), uma das estratégias bem-sucedidas para melhorar a durabilidade das ligações entre a madeira e os adesivos, as quais apresentam baixa resistência a delaminação, é o uso de um primer. O primer é um produto usado basicamente para o tratamento das superfícies a serem unidas.

Ohnesorge (2010) constatou que elementos de MLC confeccionados com lamelas de madeiras de *Fagus sylvatica L.* com 38 mm de espessura e colados com o adesivo melanina-ureia-formaldeído apresentaram maior porcentagem de delaminação que elementos de MLC produzidos com lamelas de espessuras de 29 mm e 35 mm.

De acordo com Knorz *et al.* (2015), a qualidade da adesão das superfícies das lamelas depende do equipamento utilizado em sua preparação. Cada máquina diferente produz um tipo de textura na madeira devido aos danos causados nas faces das células. Em superfícies aplainadas, as características da madeira estão relacionadas com as marcas das facas por centímetro e não só pela velocidade da ferramenta.

Ferdosian *et al.* (2017) apresenta uma revisão de diversos estudos que discutem os fatores que controlam a penetração do adesivo e como estes interferem na linha de cola. Também apresentam alguns métodos para a quantificação da penetração e correlações entre a penetração e a qualidade da colagem.

3.9 CONCLUSÕES GERAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada sobre o tema “análise da qualidade da colagem de elementos de MLC” possibilitou a observação dos seguintes aspectos:

De um modo geral, apesar do crescente interesse no estudo da qualidade de colagem de elementos de MLC, observa-se que as investigações experimentais nacionais realizadas até o momento ainda não produziram conclusões suficientes sobre os métodos de ensaio para a análise da qualidade de colagem de elemento de MLC.

Na prática, os elementos de MLC são confeccionados a partir da colagem das lamelas para diferentes combinações espécie/adesivo, mas poucos estudos abordam a questão da qualidade da superfície das lamelas para a colagem entre lamelas de madeira.

Vários são os parâmetros a serem observados na confecção de elementos de MLC para uma melhor resposta de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, dentre eles: acabamento da superfície das lamelas, umidade de colagem, tipo (conífera ou folhosa) e região (cerne e alburno) da madeira, tipo de adesivo, pressão de colagem, espessura das lamelas, além da gramatura do adesivo com especificação de aplicação em uma ou duas lamelas, e viscosidade do adesivo.

Foi percebida uma carência de estudos nacionais que avaliem experimentalmente, em particular, as respostas de elementos de MLC, com relação à delaminação e à resistência ao cisalhamento das linhas de cola, com base no projeto de norma ABNT NBR 7190-6 (2022).

A maioria dos estudos nacionais observados, neste caso, consideram normas estrangeiras na avaliação da delaminação como também corpos de prova do tipo “*double shear*” na análise da resistência ao cisalhamento da linha de cola. Esses corpos de prova nem sempre representam as reais características do elemento de MLC, conforme recomendação do projeto de norma ABNT NBR 7190-6 (2022), ou seja, um corpo de prova que deve ser retirado do mesmo elemento de MLC confeccionado.

Em relação a análise dos modos de ruptura nas linhas coladas, após os ensaios de cisalhamento, existe a necessidade de utilização de métodos mais precisos que quantifiquem as áreas com as porcentagens de ruptura na madeira, no adesivo ou porcentagens de rupturas mistas (madeira e adesivo). A maioria dos estudos observados quantificam a ruptura na região de colagem de forma visual, embora essa informação não apareça de forma clara e objetiva nos trabalhos analisados.

Um único estudo envolvendo diferentes acabamentos superficiais foi observado na literatura nacional, realizado por Serrano (2013), utilizando diferentes velocidades de avanço no fresamento realizado pela plaina desengrossadeira. São necessárias informações mais precisas sobre a velocidade de corte da ferramenta utilizada na preparação da lamela, como também sobre a rugosidade da superfície obtida para as lamelas em função da usinagem, além de estudos envolvendo a permeabilidade do adesivo na madeira, com quantificação da viscosidade, tendo em vista o tipo de adesivo utilizado.

Alguns estudos internacionais relatam maiores porcentagens de delaminação para colagens que utilizam maiores espessuras de lamela.

Portanto, o presente trabalho foi desenvolvido no sentido de complementar algumas dessas lacunas observadas na literatura, ou seja, com informações sobre a influência do lixamento das superfícies das lamelas de MLC na resposta da resistência e rigidez de elementos de MLC e também na resposta da qualidade de colagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida utilizando-se madeiras de reflorestamento das espécies Cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem. var *australis*) e de Cedro indiano (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn), com aproximadamente 10 anos de idade, provenientes do plantio da empresa Vale do Cedro, localizada no município de Ribeirão Branco, estado de São Paulo.

Para a colagem dos elementos de MLC foram utilizados dois tipos de adesivos: resorcinol-formaldeído com catalizador em pó (Cascophen RS-216-M) e o poliuretano bicomponente (AG101, KEHL Ind. e Com. Ltda), no qual os componentes foram misturados na proporção de 1:1, com tempo de início de cura de aproximadamente 30 minutos (KEHL, 2011).

4.1 CORPOS DE PROVA DE CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS

Foram utilizadas peças de madeira, com dimensões nominais de 6 cm x 16 cm x 300 cm, para retirar as lamelas utilizadas na confecção dos elementos de MLC e dos corpos de prova de caracterização mecânica e física. Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Serraria e Beneficiamento da UNESP – Instituto de Ciência e Engenharia de Itapeva.

Primeiramente as tábuas foram aplainadas na desengrossadeira e desempenadeira para padronizar as superfícies longitudinalmente (Figura 19a), em seguida foi realizado o seccionamento das peças e a retirada das lamelas que seriam utilizadas na fabricação dos elementos de MLC (Figura 19b).

Figura 19 – Processos de: (a) Aplainamento; (b) Seccionamento para obtenção das lamelas.



(a)



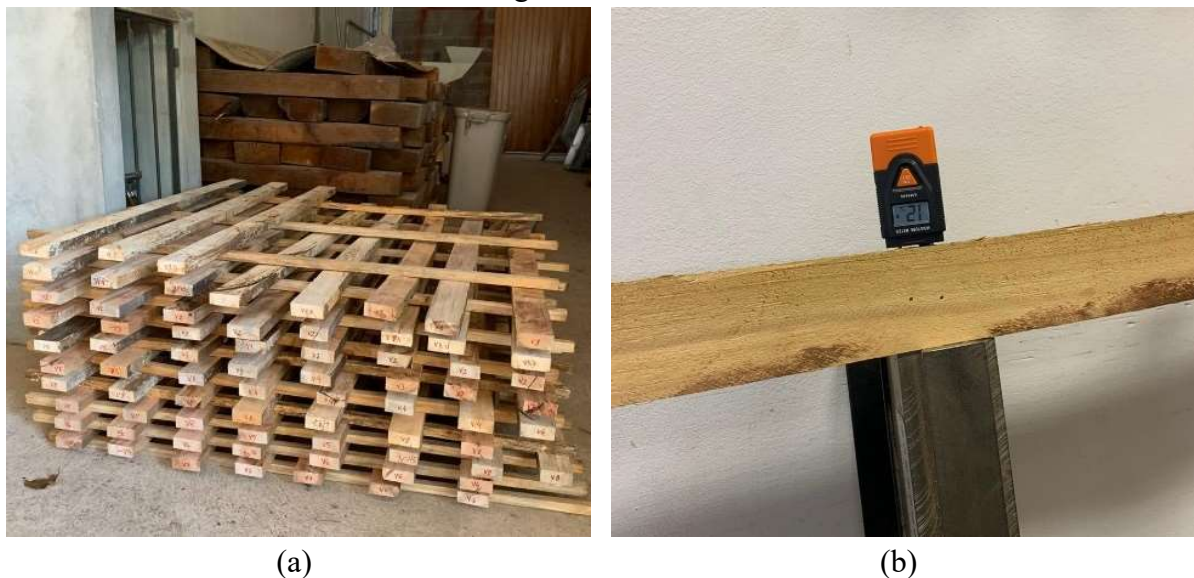
(b)

Fonte: Autoria própria.

Além das lamelas, foram retirados, de cada tábua, os corpos de prova para determinação da densidade, compressão paralela às fibras e cisalhamento paralelo às fibras, de acordo com as recomendações da normativa ABNT NBR 7190-3 (2022).

As lamelas e os corpos de prova foram identificados e armazenados em local aberto para secagem até umidade de $12\% \pm 1\%$. Para a secagem as lamelas foram entabicadas (Figura 20a) e tiveram seu teor de umidade controlado com o auxílio do medidor elétrico da marca *Moisture Mete 4806* (Figura 20b).

Figura 20 – Controle de secagem das lamelas: (a) Entablicamento; (b) Acompanhamento da secagem das lamelas.



Fonte: Autoria própria.

Ao atingir a umidade desejada ($12\% \pm 1\%$), esses materiais foram armazenados em ambiente com temperatura e umidade controlados, para manutenção da umidade até o momento dos ensaios de caracterização mecânica.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A determinação das propriedades físicas e mecânicas dos lotes de madeiras utilizados no estudo foram realizados com base na normativa ABNT NBR 7190-3 (2022), correspondente ao Anexo B da NBR 7190 (1997), uma vez que esta pesquisa foi iniciada antes da publicação da versão atual da ABNT NBR 7190 (2022). Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Propriedades Mecânicas da UNESP – Instituto de Ciência e Engenharia de Itapeva.

4.2.1 Caracterização física das espécies de madeiras

As propriedades físicas determinadas foram: umidade, densidade básica (ρ_{bas}), densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$), retratibilidade (ϵ_r), inchamento (ϵ_i), e coeficiente de anisotropia (CA). Os ensaios seguiram os procedimentos descritos pela norma ABNT NBR 7190-3 (2022), utilizando corpos de prova de seção transversal retangular, com dimensões nominais de 3,0 x 2,0 x 5,0 cm (radial x tangencial x longitudinal). Foram realizadas 30 repetições por espécie estudada.

Para a determinação da densidade básica (ρ_{bas}) e retratibilidade (ϵ_r) os corpos de prova foram submersos em água até atingirem o estado de saturação e, em seguida, pesados e medidos nas três dimensões, obtendo-se a massa e o volume saturados. Posteriormente, os corpos de prova foram mantidos em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, sendo realizadas medições de massa e dimensões a cada 6 horas até diferença mínima de 0,5% a partir da última medição.

Para o estudo do inchamento (ϵ_i), o corpo de prova seco foi colocado em água para ser reidratado, com medições de massa e dimensões sendo realizadas a cada 6 horas até atingirem massa constante, seguindo os mesmos procedimentos realizados no teste de retração.

As deformações de retração (ϵ_r) e inchamento (ϵ_i) foram determinadas pela Equação (4) e (5), para as direções 1, 2 e 3, correspondentes às direções axial, radial e tangencial, respectivamente.

$$\epsilon_{r,x} = \left(\frac{L_{x,sat} - L_{x,seco}}{L_{x,sat}} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$\epsilon_{i,x} = \left(\frac{L_{x,sat} - L_{x,seco}}{L_{x,seco}} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

Onde:

$L_{x,sat}$: é o comprimento do corpo de prova saturado na direção analisada (1, 2 ou 3), em mm;

$L_{x,seco}$: é o comprimento do corpo de prova seco na direção analisada (1, 2 ou 3), em mm.

Os coeficientes de anisotropia (CA) das espécies foram obtidos pela Equação (6).

$$CA = \frac{\epsilon_{r,3}}{\epsilon_{r,2}} \quad (6)$$

Onde:

$\epsilon_{r,2}$: é a deformação devido a retração no sentido radial (2), em %;

$\epsilon_{r,3}$: é a deformação devido a retração no sentido tangencial (3), em %;

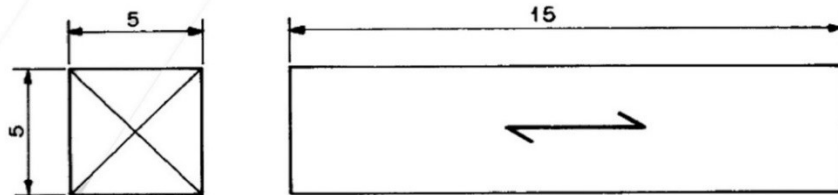
4.2.2 Caracterização mecânica das espécies de madeiras

As propriedades mecânicas determinadas foram: resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) e módulo de elasticidade paralelo às fibras (E_{c0}), sendo realizadas 30 repetições por espécie para cada propriedade ensaiada.

Os módulos de elasticidade na flexão (E_M ou MOE) foram obtidos para cada lamela individualmente, utilizando ensaio não-destrutivo de flexão de 3 pontos.

Para o ensaio de compressão paralela às fibras (f_{c0}) foram utilizados corpos de prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e 15 cm de comprimento (Figura 21).

Figura 21 – Corpo de prova para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) foi calculada a partir da Equação (7).

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Onde:

$F_{c0,max}$: é a força de compressão máxima aplicada ao corpo de prova, em N;

A : é a área inicial da seção transversal que sofre compressão, em mm^2 .

O módulo de elasticidade paralelo às fibras (E_{c0}) foi calculado a partir da Equação (8).

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

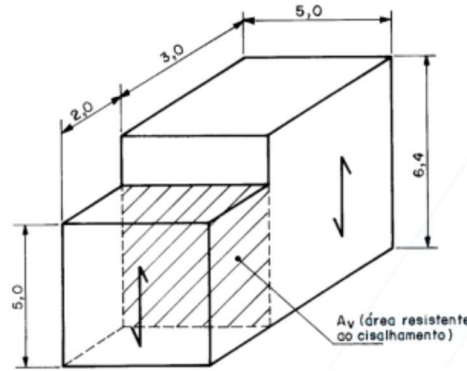
Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$: é tensão referente à 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras, obtida no último ciclo de carga, em N/mm^2 ;

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$: é a deformação referente à 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras;

Para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) foram utilizados corpos de prova conforme indicado na Figura 22, com dimensões em cm, e fabricado com o plano da seção crítica paralelo à direção radial da madeira.

Figura 22 – Corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) foi calculado a partir da Equação (9).

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

Onde:

$F_{v0,max}$: é a força cisalhante máxima aplicada ao corpo de prova, em N;

A_{v0} : é a área inicial da seção crítica do corpo de prova no plano paralelo às fibras, em mm^2 .

O módulo de elasticidade (E_M ou MOE) das lamelas foi obtido através do ensaio de flexão de três pontos, de forma não destrutiva, onde as lamelas foram solicitadas até o limite de serviço de $L/200$. A distância entre apoios, neste caso, considerou a relação $L/h \geq 21$ para minimizar o efeito da parcela de deformação por cisalhamento na flecha final obtida no meio do vão.

O valor do módulo de elasticidade (E_M) das lamelas foi obtido a partir da Equação (10).

$$E_M = \frac{P \times L^3}{4 \times \delta \times b \times h^3} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

Onde:

P : é a força no trecho linear da curva, em MPa;

L : é a distância entre apoios, em mm;

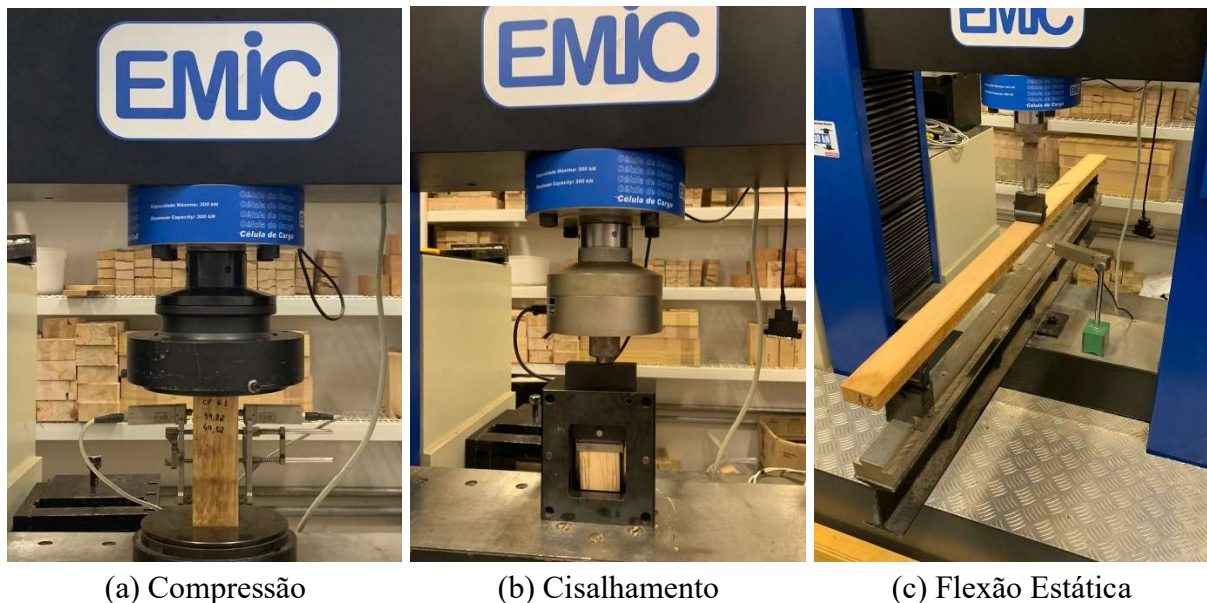
δ : é a flecha correspondente à força P , em mm;

b e h : é a largura e altura, respectivamente, da seção transversal do corpo de prova, em mm.

O corpo de prova utilizado neste ensaio possuía forma prismática com área da seção transversal de dimensões 2,2 cm x 6 cm e comprimento total de 130 cm. Vale mencionar que essas dimensões foram tomadas com o objetivo posterior de usinagem antes da colagem para atingirem as dimensões finais de 2 cm x 5 cm x 130 cm. A distância entre apoios utilizado no ensaio foi de 105 cm.

A Figura 23 apresenta os ensaios de compressão, cisalhamento e flexão em 3 pontos realizados para a caracterização mecânica das amostras utilizando a máquina universal de ensaios EMIC, com capacidade de carga de 300 kN.

Figura 23 – Ensaios de caracterização mecânica dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Os valores de módulo de elasticidade e resistência foram corrigidos para a umidade de 12% pela Equação (11) e (12), respectivamente.

$$E_{12\%} = E_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (U - 12)}{100} \right] \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

$$f_{12\%} = f_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U - 12)}{100} \right] \quad [\text{MPa}] \quad (12)$$

Onde:

$E_{U\%}$: é o módulo de elasticidade na umidade inicial, em MPa;

$f_{U\%}$: é o valor de resistência na umidade inicial, em MPa;

U : é a umidade inicial do corpo de prova no momento do ensaio.

Segundo a normativa ABNT NBR 7190-3 (2022), todas as propriedades de resistências devem ser expressas como valores característicos, e são calculados pelo estimador centrado de acordo com a Equação (13).

$$x_k = \left(2 x \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - x_{\frac{n}{2}} \right) x_{1,1} \quad (13)$$

Onde os resultados devem ser colocados em ordem crescente $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar, não se tomando para x_k valor inferior a x_1 , nem a 0,7 do valor médio, nem superior ao valor médio da amostra completa (valor característico estatisticamente é inferior ao valor médio x_{med}).

4.3 CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS LAMELAS

A classificação visual foi realizada com base na normativa ABNT NBR 7190-2 (2022) para peças estruturais, conforme os critérios especificados na Tabela 4 para espécies folhosas.

Na classificação por nós, só foram avaliados aqueles presentes nas duas faces da peça e que estão fixos, excluindo-se as bordas e topo. As peças que apresentaram ocorrências de nós cariados, soltos ou vazados foram descartadas.

Para auxiliar na verificação dos tamanhos dos nós e atribuição de classe (Classe 1, 2 e 3), foi elaborado um gabarito em acrílico com a demarcação do tamanho máximo que cada nó pode ter em cada uma das classes (Figura 24).

Figura 24 – Gabarito confeccionado em acrílico para auxiliar na medição dos nós.

NBR		6cm		ASTM 245	
Pinos	Eucal.	CFL	BFL	FE	
		3 75%			
$\frac{2}{3}$ 3		2 60%			
		1 50%			
$\frac{1}{2}$ 2	$\frac{1}{2}$ 3		3 50%	3 50%	
	$\frac{1}{3}$ 2		2 30%	2 30%	
	$\frac{1}{4}$ 1	SS 40%	1 25%	1 25%	
	$\frac{1}{5}$ 1		SS 20%	SS 20%	

Fonte: Autoria própria.

4.4 PREPARAÇÃO DAS LAMELAS

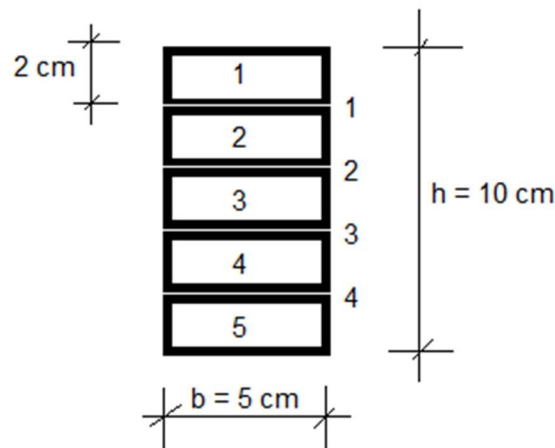
4.4.1 Separação das lamelas

Para a fabricação dos elementos de MLC (vigas), as lamelas foram classificadas com base nos resultados obtidos na caracterização física (ρ_{ap}), mecânica (E_M , $E_{c0,m}$, $f_{c0,m}$ e $f_{v0,m}$) e visual. As vigas de MLC foram confeccionadas buscando-se balancear a disposição das lamelas na seção do elemento de acordo com os valores de MOE e classificação visual de cada lamela.

As lamelas com maiores valores de rigidez e classe visual foram posicionadas nas extremidades superior e inferior das vigas, e aquelas com menores valores foram posicionadas na parte central das vigas, nas proximidades da linha neutra, para confecção de vigas de MLC.

Para os ensaios de delaminação e cisalhamento das linhas de cola foram produzidos elementos de MLC com seção transversal formada por 5 lamelas, de 2 cm de espessura cada, e com 4 linhas de cola (Figura 25). As lamelas com melhores propriedades foram posicionadas nas posições 1, 2, 4 e 5, e uma lamela com qualidade inferior na posição central 3.

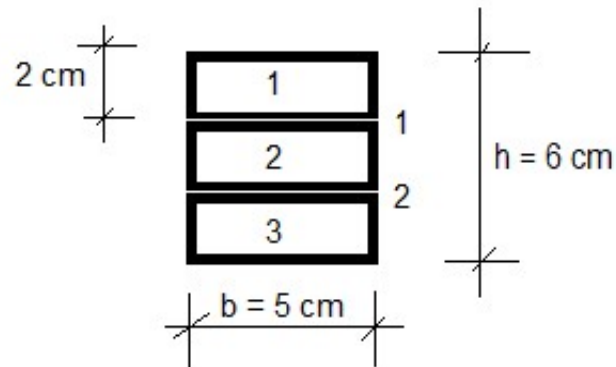
Figura 25 – Seção transversal das vigas de MLC para ensaios de delaminação e cisalhamento das linhas de cola.



Fonte: Autoria própria.

Para determinação da resistência à flexão das vigas, foram produzidos elementos de MLC com seção transversal formada por 3 lamelas de 2 cm de espessura cada, com 2 linhas de cola (Figura 26). Nesse ensaio foram utilizados elementos de MLC produzidos com 3 lamelas para conseguir manter a relação $L/h \geq 20$ pois havia limitação de abertura do vão do equipamento. As lamelas com melhores propriedades foram posicionadas nas posições 1 e 3, e uma lamela com qualidade inferior na posição central 2.

Figura 26 – Seção transversal das vigas de MLC para ensaios de resistência à flexão.



Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Acabamento das superfícies das lamelas

Para a fabricação dos elementos de MLC é preciso, primeiramente, preparar as lamelas que serão utilizadas. Segundo Paris *et al.* (2015), para a produção dos elementos de MLC, as lamelas de madeira devem estar condicionadas a 12% de umidade e recém-aplainadas antes de receber a aplicação do adesivo para padronizar a superfície e melhorar a aderência do adesivo, sendo indicado que a colagem seja realizada em um prazo de 24 horas após esse processamento.

Assim, todas as lamelas com dimensões 2,2 cm x 6 cm x 130 cm passaram pela plaina desengrossadeira (Figura 27) para padronização da superfície no sentido longitudinal, e para remoção das tortuosidades e imperfeições da peça.

Figura 27 – Aplainamento das lamelas em plaina desengrossadeira.



Fonte: Autoria própria.

Após o aplainamento na desengrossadeira, as peças ficaram com 2 cm de espessura e 5 cm de largura. Essas lamelas recém-aplainadas foram separadas em 4 conjuntos para confecção dos elementos de MLC, sendo um conjunto de lamelas com apenas o aplainamento (sem lixamento da superfície), e outros 3 conjuntos que iriam receber uma segunda preparação da superfície através de lixamento com lixadeira de cinta.

Foram utilizados três diferentes níveis de lixamento para as superfícies dos conjuntos de lamelas considerados, sendo eles: lixamentos com lixas de granulações 80 (grossa), 120 (intermediária) e 220 (fina). O lixamento deu-se de forma cumulativa, ou seja, a lamela lixada com lixa 220 passou, primeiramente, pelas lixas 80 e 120. Com o intuito de padronizar o processo, foi determinado um tempo de 30 segundos para cada lamela permanecer sobre a lixa.

Após o lixamento as superfícies das lamelas foram submetidas a limpeza por ar comprimido para retirada de sujeiras e pó provenientes dos processos de aplainamento e lixamentos, garantindo assim que as superfícies estivessem limpas antes da colagem.

4.4.3 Medição da rugosidade das superfícies

A verificação da qualidade dos lixamentos das superfícies das lamelas foi realizada com o auxílio do rugosímetro portátil *Surtronic 2.5+*, da marca Taylor Hobson, pertencente ao Laboratório de Usinagem da Madeira da UNESP – Instituto de Ciência e Engenharia de Itapeva.

Esse equipamento possui um sistema eletrônico no qual uma ponta de diamante, com diâmetro de 0,2 μm , entra em contato com a peça, faz a varredura da sua superfície (Figura 28), e fornece os valores de rugosidade, com base em parâmetros de amplitude e espaçamento.

Figura 28 – Medição da rugosidade superficial das superfícies das lamelas.



Fonte: Autoria própria.

Foi utilizado um range de 300 μm e o método de filtragem Gaussiano para obtenção do parâmetro de medição R_a (rugosidade média). O comprimento de amostragem (*cut-off*) adotado foi de 2,5 mm, que corresponde a um percurso de medição (*lm*) de 12,5 mm.

Foram realizadas seis medições da rugosidade superficial, conforme recomendações da norma ISO 4287 (2002), para cada superfície das lamelas utilizadas na confecção dos elementos de MLC para avaliar o acabamento das lamelas. Essas medições foram realizadas no sentido de avanço da ferramenta de usinagem (longitudinal) utilizada no processo de desgrosso.

4.5 FABRICAÇÃO DAS VIGAS DE MLC

4.5.1 Determinação da viscosidade dos adesivos

A determinação da viscosidade dos adesivos foi realizada seguindo recomendações da norma ASTM D1200 (2018). O método baseia-se na medida do tempo que um volume fixo de adesivo gasta para escoar através de um orifício calibrado na base do copo.

Para a determinação da viscosidade foi utilizado o Copo Ford de orifício 05, onde o orifício foi fechado com o dedo, e depositou-se o adesivo até o nível máximo do copo, removendo o excesso do produto utilizando uma placa de vidro plana (Figura 29). O orifício do copo foi então liberado e ao mesmo tempo acionou-se o cronômetro, que foi pausado quando ocorreu o esvaziamento do volume, sendo registrado o tempo em segundos.

Figura 29 – Determinação da viscosidade com Copo Ford.



Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção deste tempo (t) de escoamento foi calculada a viscosidade cinemática dos dois adesivos estudados, utilizando a Equação (15).

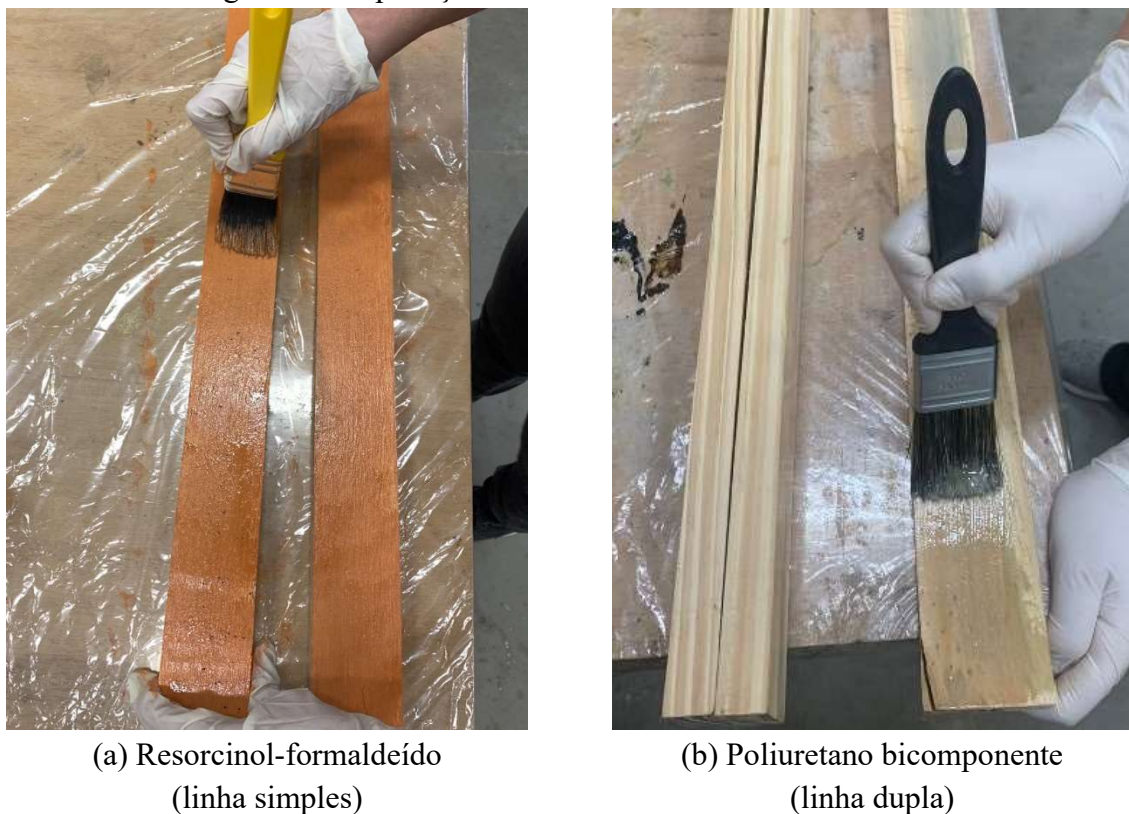
$$v = 12,1 \times (t - 2) \quad [cSt] \quad (15)$$

4.5.2 Colagem do MLC

Os adesivos utilizados para a colagem foram o resorcinol-formaldeído com catalizador em pó (Cascophen RS-216-M), com viscosidade de 5574 cP, e o poliuretano bicomponente (AG101, KEHL Ind. e Com. Ltda) com viscosidade de 1997 cP.

A gramatura utilizada, para ambos os adesivos, foi de 240 g/m³, estabelecida em estudos preliminares, e a aplicação dos adesivos foi realizada com o auxílio de um pincel. Para o adesivo resorcinol-formaldeído a aplicação foi feita em linha simples (Figura 30a), e para o adesivo poliuretano bicomponente em linha dupla (Figura 30b).

Figura 30 – Aplicação do adesivo nas lamelas de madeira.



Fonte: Autoria própria.

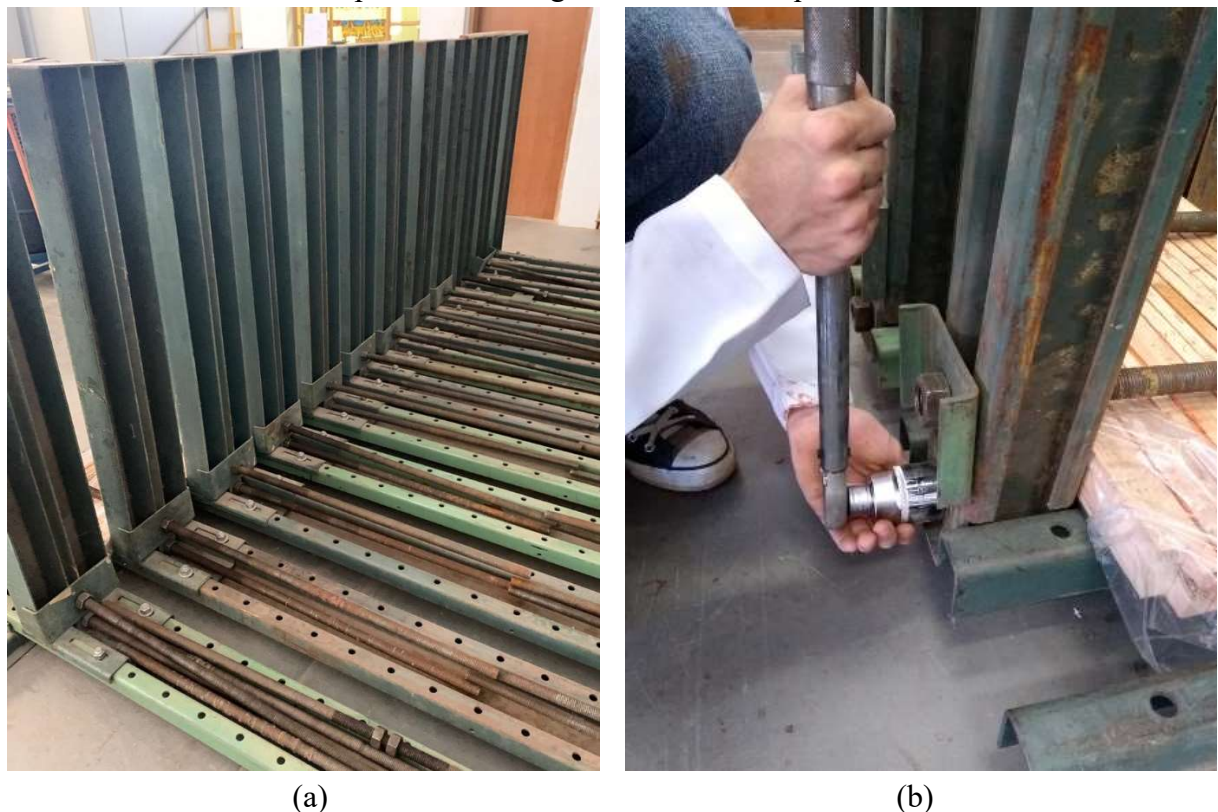
Após esse procedimento, as lamelas foram posicionadas conforme a ordem estabelecida anteriormente, e levadas para a prensa.

A pressão utilizada para a prensagem dos elementos de MLC seguiu o especificado nos estudos realizados por Azambuja (2006) e pela norma ABNT NBR 7190-6 (2022), ou seja, para as madeiras com densidade aparente média superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$ a pressão de colagem é de 1,2 MPa, e para as madeiras com densidade inferior a $0,5 \text{ g/cm}^3$ a pressão de colagem é de 0,7 MPa.

As lamelas de Cedro indiano e de Cedro australiano apresentaram densidade aparente média inferior a $0,5 \text{ g/cm}^3$, sendo então utilizada a pressão de 0,7 MPa para ambas as madeiras.

A prensagem foi realizada com uma prensa industrial de chão (Figura 31a), utilizando distribuição de pressão ao longo do comprimento de cada viga produzida através da aplicação de torque nos parafusos (barras roscadas) distribuídos ao longo do comprimento das vigas (Figura 31b) com o uso de um torquímetro de estalo.

Figura 31 – Prensagem dos elementos de MLC: (a) Prensa industrial de chão; (b) Aplicação de pressão de colagem utilizando torquímetro.



Fonte: Autoria própria.

O torque necessário para a aplicação de uma pressão de 0,7 MPa foi de 24,74 N.m/parafuso. O torque no parafuso (T) foi calculado utilizando a Equação (14), formulação recomendada por Budynas e Nisbtt (2016).

$$T = 0,21 \times F_p \times D_p \quad [N.m] \quad (14)$$

Onde:

F_p : é a força exercida por cada parafuso na barra roscada, em N;

D_p : é o diâmetro da porca, em m.

Para garantir a cura completa dos adesivos e tempo de prensagem suficiente, as vigas foram mantidas sob pressão (Figura 32) por um período de 72 horas, conforme especificado nas instruções dos fabricantes.

Figura 32 – Prensagem das vigas em prensa industrial.



Fonte: Autoria própria.

Para os ensaios de cisalhamento e delaminação das linhas de cola foram fabricadas 24 vigas com madeira de Cedro indiano e 24 com madeiras de Cedro australiano, sendo, portanto, um total de 48 elementos de MLC com 5 lamelas, com dimensões totais de 5 cm x 10 cm x 125 cm para retirada dos corpos de prova. Foram produzidas 3 vigas para cada combinação.

Para os ensaios de flexão das vigas foram produzidas 5 vigas para cada combinação de espécie-adesivo-acabamento, um total de 80 elementos de MLC, sendo 40 vigas de cada espécie de madeira, utilizando 3 lamelas, com dimensões totais de 5 cm x 6 cm x 125 cm. As dimensões buscaram manter a relação $L/h \geq 20$ durante os ensaios das vigas, pois havia limitação na distância de apoio do equipamento utilizado.

4.5.3 Confeção dos corpos de prova para os testes de qualidade de colagem

Ao final do período de prensagem, os elementos de MLC passaram por desgrossadeira e serra circular, para padronizar a superfície das vigas e cortar suas extremidades (Figura 33).

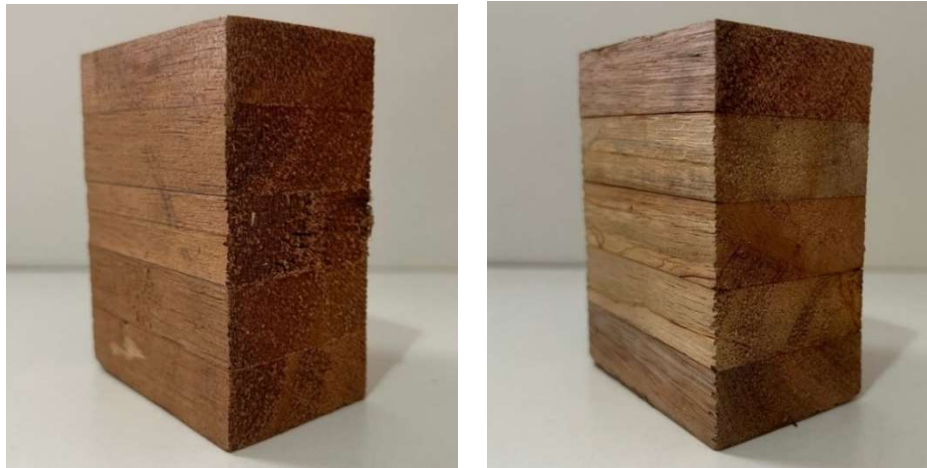
Figura 33 – Padronização dos elementos de MLC produzidos.



Fonte: Autoria própria.

De cada viga foram retirados 8 corpos de prova para os ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola (Figura 34), sendo descartado um corpo de prova de cada extremidade. Também foram retiradas as amostras para as análises de microscopia.

Figura 34 – Corpos de prova para delaminação e cisalhamento das linhas de cola.



Fonte: Autoria própria.

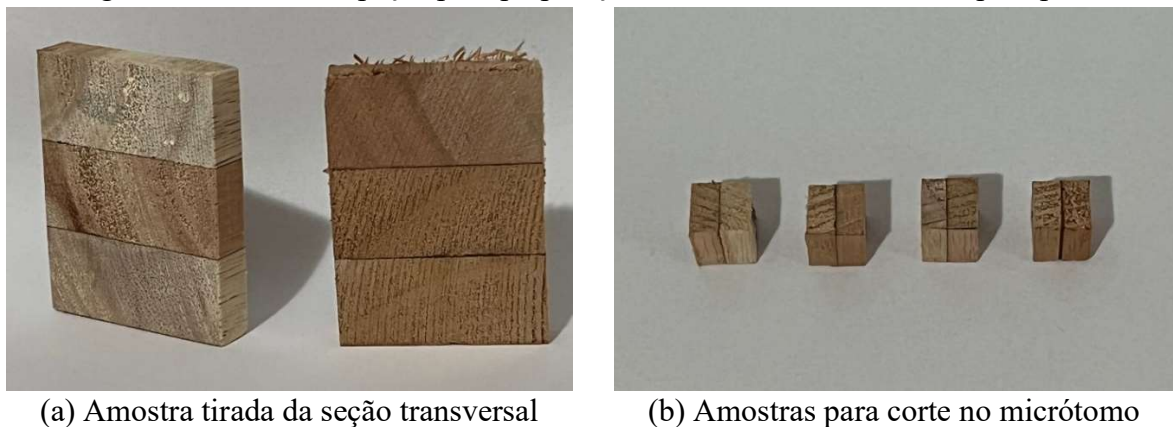
Assim, foram efetivamente considerados, para cada viga de MLC confeccionada, 3 corpos de prova com dimensões 5 cm x 10 cm x 7,5 cm para os ensaios de delaminação e outros 3 para os ensaios de resistência ao cisalhamento das linhas de cola. Cada combinação espécie-adesivo-acabamento teve 9 repetições de ensaios para a obtenção dos resultados.

As dimensões e quantidades dos corpos de prova buscaram atender a proposta do método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022), como também a disponibilidade de madeira adquirida e a limitação das dimensões do dispositivo metálico confeccionado para o ensaio de cisalhamento das linhas de cola.

4.6 ENSAIO DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Para o estudo da interface madeira-adesivo, por microscopia óptica, foram preparadas amostras a partir dos elementos de MLC confeccionados, de onde foram retiradas peças com aproximadamente 1 cm de espessura, com largura e altura em função da seção transversal da viga (Figura 35a). A partir dessas peças foram cortados corpos de prova de aproximadamente 1 cm x 1 cm x 1 cm (Figura 35b), dimensões compatíveis com o equipamento de microtomia.

Figura 35 – Corte das peças para preparação das amostras de microscopia óptica.



Fonte: Autoria própria.

Essas peças foram inseridas em uma câmara de vácuo (Figura 36a) para saturação em solução de água e glicerina (1:1) e então levadas para cozimento por um período de 8 horas (Figura 36b), buscando tornar as peças de madeira aptas ao corte sem danificar o material.

O corte das amostras foi realizado com o auxílio do micrótomo SM2000R, da marca Leica (Figura 37a) pertencente ao Laboratório de Anatomia da Madeira da UNESP – Instituto de Ciência e Engenharia de Itapeva. Foram retiradas 4 amostras de cada tratamento, da posição

transversal à linha de cola, com 25 μm (micrómetros) de espessura, para montagem das lâminas provisórias de observação no microscópio óptico (Figura 37b).

Figura 36 – Preparação das amostras: (a) Saturação em câmara de vácuo; (b) Cozimento.



(a)



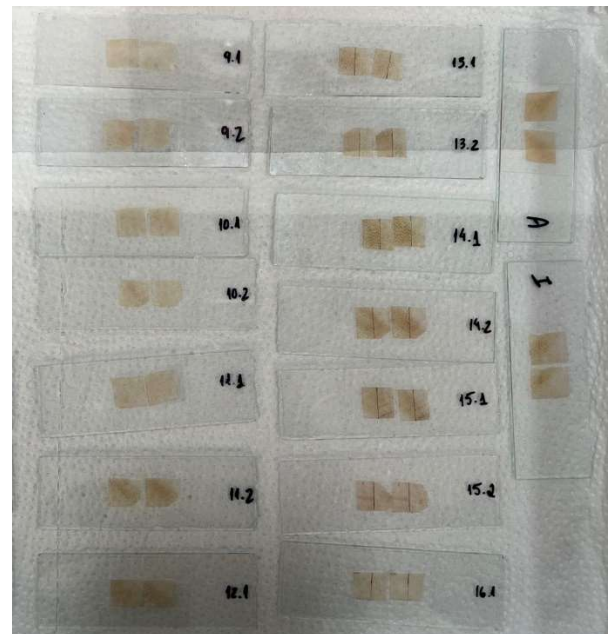
(b)

Fonte: Autoria própria.

Figura 37 – Preparação das lâminas: (a) Corte das amostras no micrótomo; (b) Lâminas para microscopia prontas.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

No microscópio óptico foi explorada a interação que ocorre entre a luz e os objetos observados, podendo ser por meio da transmissão para amostras transparentes ou reflexão para amostras opacas. Neste trabalho foi utilizado o modo de observação de luz transmitida.

O microscópio utilizado foi o DM 2500 com iluminação LED, da marca Leica, com câmera acoplada ao computador (Figura 38) para obtenção das imagens. Para a aquisição e análise dos dados foi utilizado o *software* Leica QWin Standard V 3.5.1 (2008).

Figura 38 – Análise das amostras no microscópio de luz transmitida.



Fonte: Autoria própria.

Com a análise microscópica buscou-se avaliar a fase pura do adesivo (linha de cola), a interface (superfície entre o adesivo e a madeira) e a interfase (área de penetração do adesivo, adjacente a interface).

Foram analisadas 4 lâminas de cada combinação de espécie-adesivo-acabamento, das quais foram retiradas 12 medidas de espessura ao longo das linhas de cola, totalizando 48 medidas para cada combinação.

Além da espessura da linha de cola, foi analisada a interfase de colagem dos elementos de MLC, buscando quantificar a penetração do adesivo nas estruturas da madeira. As imagens da interfase foram amplificadas em 100 vezes.

4.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA

O ensaio de resistência ao cisalhamento das linhas de cola foi realizado seguindo-se as especificações da ABNT NBR 7190-6 (2022), e, consequentemente, da EN 14080 (2013), utilizando-se a máquina universal de ensaios EMIC, que tem capacidade de 300 kN, associada a um dispositivo metálico construído especificamente para esta finalidade (Figura 39).

Após a falha do corpo de prova, a força máxima suportada foi registrada e o valor de resistência ao cisalhamento (f_{v0}) para a linha de cola foi determinado com a Equação (1).

Figura 39 – Ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola.



(a) Dispositivo metálico

(b) Ensaio de cisalhamento

Fonte: Autoria própria.

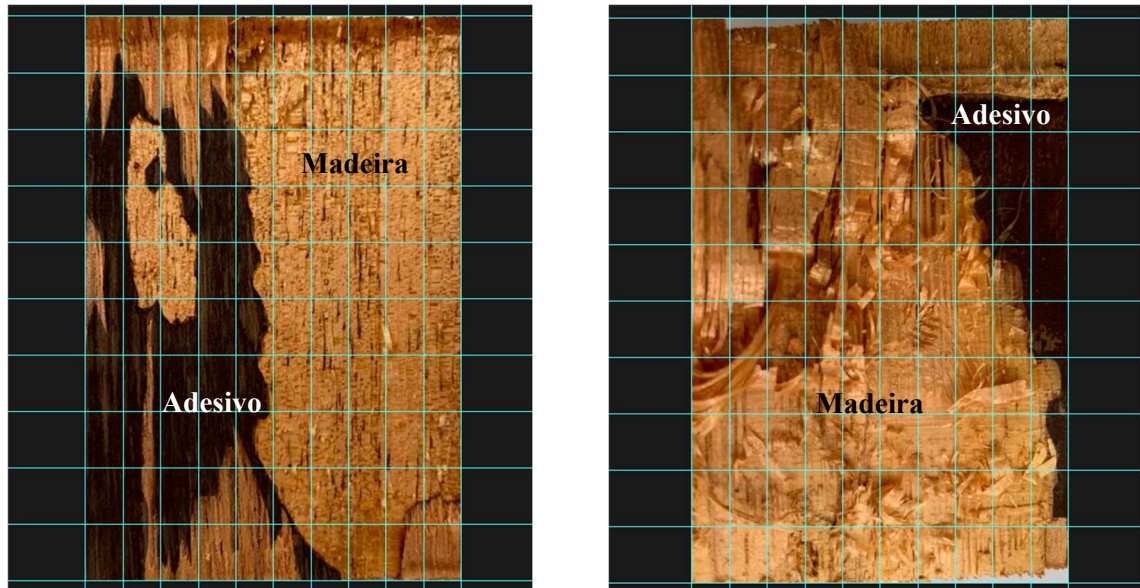
A porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo, para as regiões de colagem dos corpos de prova, após os ensaios de cisalhamento das linhas de cola, foram avaliadas visualmente com o auxílio de um programa editor de imagens (Adobe Photoshop CC, 2020).

No programa foi criado uma malha quadriculada com 100 elementos de divisão, a qual foi aplicada sobre a imagem da face esquerda de cada uma das linhas de cola rompidas para cada combinação adesivo-acabamento estudado, como apresentado na Figura 40.

Esse procedimento permitiu a quantificação visual do modo de ruptura predominante (na madeira ou no adesivo) na região de colagem analisada. Para melhor visualização foi aplicado um realce nas imagens nos pontos em que havia adesivo.

Foram analisados 9 corpos de prova, um total de 36 linhas de cola rompidas, para cada combinação estudada, para obtenção da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo.

Figura 40 – Esquema utilizado para quantificação da porcentagem de ruptura.



Fonte: Autoria própria.

4.8 ENSAIOS DE DELAMINAÇÃO DAS LINHAS DE COLA

A normativa EN 14080 (2013) especifica três diferentes procedimentos (A, B e C) para o ensaio de delaminação da linha de cola, de acordo com o ambiente onde o elemento será exposto e o tipo de adesivo. Dois desses procedimentos (B e C) estão indicados na norma brasileira.

A interpretação da norma ABNT NBR 7190-6 (2022), a partir da EN 14080 (2013), considera para o caso de adesivo de uso externo o procedimento de ensaio B, indicado para ambiente interno (no que se refere ao tempo de pressão e vácuo sem repetição), com limites de delaminação iguais a 4% (coníferas) e 6% (folhosas). Essa interpretação foi adotada no documento tendo-se em vista que o clima brasileiro não é tão rígido quanto ao clima do continente europeu, tornando-o condizente com realidade das estruturas brasileiras.

Para a determinação das porcentagens de delaminação, foram medidos os comprimentos de cada linha de cola das faces (frontal e posterior) da seção transversal de cada corpo de prova, com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,1 mm (Figura 41a), e determinada a massa de cada cp com resolução de 1 g (Figura 41b).

Figura 41 – (a) Medição e (b) pesagem dos corpos de prova de delaminação.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

O ensaio foi realizado segundo a normativa ABNT NBR 7190-6 (2022), utilizando-se uma autoclave em formato cilíndrico especialmente confeccionada para esta finalidade, com 105 cm de comprimento, 48 cm de diâmetro e 1,1 cm de espessura de parede. O equipamento possui uma bomba de vácuo com manômetro de 75 kPa, um tambor para armazenamento de água e um cilindro acoplado ao equipamento para controlar o excesso de água ao longo da etapa de aplicação de vácuo. Para a aplicação da pressão foi utilizado um sistema externo de ar comprimido, com magnitude controlada pelo manômetro. A Figura 42 apresenta o equipamento utilizado.

Figura 42 – Autoclave utilizada para o ensaio de delaminação da linha de cola.



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram colocados no interior da autoclave e uma grelha foi posicionada sob eles para garantir que as amostras fiquem submersas durante a sua realização (Figura 43).

Figura 43 – Corpos de prova no interior da autoclave para ensaio de delaminação.



Fonte: Autoria própria.

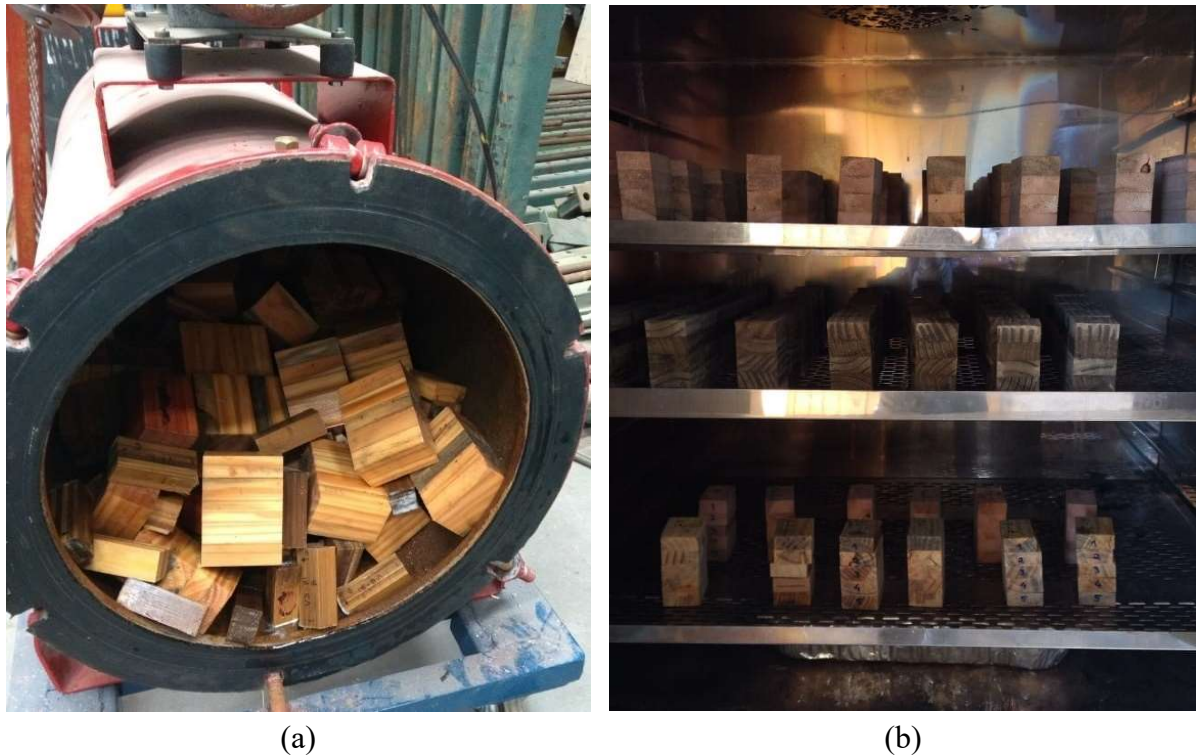
Após o fechamento da porta de entrada se deu início a introdução de água em seu interior, com temperatura entre 10 °C e 20 °C. Após a submersão dos corpos de prova foi aplicado um vácuo de 70 kPa e mantido por um período de 30 minutos. Após essa etapa, foi aplicada pressão entre 550 e 600 kPa, sendo mantida por um período de 2 horas.

Ao final dos períodos de vácuo e pressão (Figura 44a), os corpos de prova foram retirados da autoclave e condicionados em uma câmara climatizadora, com temperatura controlada entre 65 e 75°C, umidade relativa entre 8% e 10% e velocidade de ar circulante de 2 m/s.

Na climatizadora, os corpos de prova foram dispostos com distância de 50 mm entre si, com as seções transversais cortadas posicionadas em paralelo ao fluxo de ar, sendo mantidos na câmara climatizadora até a massa alcançar um valor compreendido entre 100% e 110% da massa inicial do corpo de prova determinado antes da realização do ensaio (Figura 44b).

A secagem dos corpos de prova na climatizadora teve duração de 19 a 22 horas. Depois de no máximo 1h de finalizado o procedimento de secagem, foram medidas e registradas as juntas delaminadas existentes nas duas faces da seção transversal (frontal e posterior) dos corpos de prova, com auxílio de um paquímetro. O percentual de delaminação total (Dt) de cada corpo de prova foi obtido pela Equação (2).

Figura 44 – Corpos de prova após ciclos de pressão e vácuo em autoclave: (a) Corpos de prova saturados; (b) Corpos de prova na na câmara climatizadora.



Fonte: Autoria própria.

Os percentuais de delaminação das linhas de cola obtidos foram analisados em função do percentual médio de delaminação de cada combinação de espécie-acabamento-adesivo. Posteriormente esses resultados médios foram comparados com os percentuais máximos de delaminação permitidos pela norma. Neste estudo, para ambas as espécies de folhosas analisadas (Cedro indiano e australiano), a porcentagem máxima de delaminação permitida foi de 6%, considerando adesivos para ambientes externos.

4.9 ENSAIO DE FLEXÃO DA VIGA

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Propriedades Mecânicas da UNESP – Instituto de Ciência e Engenharia de Itapeva, utilizando a máquina de ensaio universal EMIC.

Foi realizado o ensaio de flexão de três pontos, com uma carga centrada no meio do vão, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 7190-3 (2022). A flecha no meio do vão foi medida com um transdutor de deslocamento, do tipo LVDT com base magnética de fixação, até atingir a flecha equivalente a $L/200$.

A Figura 45 mostra o ensaio de flexão da viga sendo realizado. Vale mencionar aqui que este tipo de ensaio foi escolhido em função das limitações de dimensões do equipamento de ensaio e também devido a pesquisa ter sido iniciada antes da publicação do texto revisado da ABNT NBR 7190 (2022).

Figura 45 – Ensaio de flexão dos elementos de MLC.



Fonte: Autoria própria.

Para os ensaios de flexão da viga, os elementos de MLC foram confeccionados com 3 lamelas buscando manter a relação $L/h \geq 20$, visando eliminar o efeito do cisalhamento na flecha no meio do vão. As dimensões do MLC também foram definidas em função das dimensões da máquina de ensaios. Portanto, as dimensões dos elementos de MLC utilizados, neste ensaio, foram 5 cm x 6 cm x 125 cm e a distância entre apoios foi de 120 cm.

O módulo de elasticidade ou rigidez (E_M) dos elementos de MLC foram calculados de acordo com a Equação (16). Foram testadas 80 vigas ao todo, 40 de cada espécie de madeira, sendo 5 repetições para cada combinação de espécie-adesivo-acabamento.

$$E_M = \frac{L^3 \times (F_{0,6\%} - F_{0,3\%})}{48 \times I \times (\delta_{0,6\%} - \delta_{0,3\%})} \quad [MPa] \quad (16)$$

Onde:

$F_{0,6\%}$: é a força exercida no meio do vão com flecha igual a 0,6% do vão livre, em N;

$F_{0,3\%}$: é a força exercida no meio do vão com flecha igual a 0,3% do vão livre, em N;

L : é a distância entre apoios considerada para o ensaio, em mm;

$\delta_{0,6\%}$: é a flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,6\%}$, em mm;

$\delta_{0,3\%}$: é a flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,3\%}$, em mm;

I : é o momento de inércia da viga, em mm^4 .

Posteriormente foi realizado o carregamento (força) no elemento de MLC até sua ruptura (em um único ciclo), com vão de 120 cm, de forma que a resistência convencional à flexão (f_M) foi calculada de acordo com a Equação (17).

$$f_M = \frac{M}{W_e} \quad [\text{MPa}] \quad (17)$$

Sendo:

$$M = \frac{P \times L}{4} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad e \quad W_e = \frac{b \times h^2}{6} \quad [\text{mm}^3]$$

Onde:

M : é o momento fletor máximo para o corpo de prova no ensaio, em N.mm;

W_e : é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova, em mm^3 ;

P : é a força de ruptura, em N.

L : é a distância entre apoios considerada para o ensaio, em mm

b e h : é a largura e a altura, respectivamente, da seção transversal do corpo de prova, em mm.

4.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Para cada espécie de madeira investigada (Cedro australiano e Cedro indiano), os fatores e os níveis considerados na avaliação das propriedades de interesse consistiram no tipo de adesivo (Ad) e na forma do acabamento superficial (As), o que resultou em oito combinações experimentais distintas de cada espécie.

A análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, foi utilizada para avaliar o efeito do fator As de forma isolada, nos valores da resistência ao cisalhamento, na porcentagem de ruptura na madeira, na resistência convencional (f_M) e na rigidez (E_M) à flexão dos elementos de MLC produzidos.

Para avaliar a interação entre os fatores estudados foi realizado o método de análise DOE (*Design of Experiments*), no qual é avaliado o efeito de cada fator e também o efeito da interação entre eles (Ad x As), pois, se acusada significância da interação pela ANOVA, a interação passa a ser mais relevante do que o efeito dos fatores isolados.

O gráfico de Pareto foi utilizado para evidenciar a significância ($p\text{-value} < 0,05$) ou não ($p\text{-value} \geq 0,05$) dos fatores isolados e também da interação de ambos. No caso de não ser significativo o efeito de interação, o teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) foi utilizado com o objetivo do agrupamento das médias dos níveis dos fatores isolados.

Do teste de Tukey, A denota o grupo associado ao maior valor médio, B ao segundo maior valor médio da propriedade e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em grupos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

O teste *Anderson-Darling*, também avaliado ao nível de 5% de significância, foi utilizado para avaliar a normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA. Pela formulação do teste, $p\text{-value} \geq 0,05$ implica na normalidade da distribuição dos resíduos, o que valida os resultados obtidos da ANOVA.

Para cada tratamento foram consideradas 9 amostras para a determinação das propriedades obtidas nos ensaios de cisalhamento ($f_{v,m}$) e delaminação (Dt) das linhas de cola, e 5 para a obtenção das propriedades na flexão (f_M , E_M), o que resultou em 224 determinações para cada espécie de madeira.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 9 apresenta as nomenclaturas atribuídas a cada combinação espécie-adesivo-acabamento utilizada no desenvolvimento deste estudo.

Tabela 9 – Identificação das combinações madeira-adesivo-acabamento utilizadas.

Espécie	Adesivo	Acabamento	Nomenclatura
Cedro australiano (A)	Poliuretano Bicomponente AG101 (P)	Plaina	AP-P
		Lixa 80	AP-80
		Lixa 120	AP-120
		Lixa 220	AP-220
	Resorcinol-Formaldeído Cascophen RS-216-M (F)	Plaina	AF-P
		Lixa 80	AF-80
		Lixa 120	AF-120
		Lixa 220	AF-220
Cedro indiano (I)	Poliuretano Bicomponente AG101 (P)	Plaina	IP-P
		Lixa 80	IP-80
		Lixa 120	IP-120
		Lixa 220	IP-220
	Resorcinol-Formaldeído Cascophen RS-216-M (F)	Plaina	IF-P
		Lixa 80	IF-80
		Lixa 120	IF-120
		Lixa 220	IF-220

Fonte: Autoria própria.

Na nomenclatura usada na Tabela 9, o primeiro carácter correspondeu a espécie de madeira utilizada, sendo “A” para o Cedro australiano e “I” para o Cedro indiano; o segundo correspondeu ao tipo de adesivo utilizado, sendo “P” para o adesivo Poliuretano Bicomponente (AG101) e “F” para o adesivo Resorcinol-Formaldeído (Cascophen RS-216-M); e após o hífen foram apresentados os caracteres correspondentes aos tipos de acabamentos das superfícies das lamelas, sendo “P” para plaina, “80”, “120” e “220” para as lixas de gramaturas 80, 120 e 220, respectivamente.

No presente trabalho, as vigas de MLC produzidas com lamelas que tiveram acabamento somente por plaina desengrossadeira foram consideradas como amostras de referência, pois esta é a forma comum de confecção desse material utilizado pelas indústrias de MLC no país.

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ESPÉCIES

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados médios das propriedades física das espécies de madeiras utilizadas na confecção dos elementos de MLC: densidade aparente a 12% de umidade (ρ_{ap}), retratibilidade ($\epsilon_{r,x}$) e inchamento ($\epsilon_{i,x}$) na direção axial (1), radial (2) e tangencial (3), coeficiente de anisotropia (CA) e a variação volumétrica (ΔV).

Tabela 10 – Resultados da caracterização física do Cedro australiano e indiano.

Propriedades	Cedro australiano (<i>T. ciliata</i>) ^{1,2}	Cedro indiano (<i>A. fraxinifolius</i>) ^{1,2}
ρ_{ap} (g/cm ³)	0,384 ± 0,051 B (13,34%)	0,478 ± 0,044 A (9,37%)
$\epsilon_{r,1}$ (%)	0,39 ± 0,09 B (24,58%)	0,67 ± 0,12 A (17,37%)
$\epsilon_{r,2}$ (%)	3,93 ± 0,91 A (23,04%)	2,81 ± 0,41 B (14,61%)
$\epsilon_{r,3}$ (%)	7,41 ± 0,72 A (9,78%)	5,14 ± 1,26 B (24,45%)
$\epsilon_{i,1}$ (%)	0,39 ± 0,10 B (24,68%)	0,67 ± 0,12 A (17,49%)
$\epsilon_{i,2}$ (%)	4,10 ± 0,99 A (24,11%)	2,90 ± 0,44 B (15,03%)
$\epsilon_{i,3}$ (%)	8,00 ± 0,84 A (10,54%)	5,44 ± 1,41 B (25,98%)
CA	1,88 ± 0,46 A (24,58%)	1,83 ± 0,49 A (26,60%)
ΔV	12,86 ± 1,21 A (9,44%)	9,22 ± 1,58 B (17,13%)

¹ Valor médio ± desvio padrão. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na horizontal, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

A densidade aparente média a 12% de umidade (ρ_{ap}) obtida para o Cedro australiano foi de 0,384 g/cm³ e para o de Cedro indiano foi de 0,478 g/cm³, ao realizar a ANOVA, o teste de Tukey mostrou que as densidades apresentaram diferenças significativas.

Ambos os valores obtidos para as densidades estão condizentes com os valores encontrados na literatura para essas espécies de madeira, sendo de 0,31 a 0,42 g/cm³ para o Cedro australiano (PEREYRA *et al.*, 2006; ZIECH, 2008; TRIANOSKI *et al.*, 2014) e de 0,44 a 0,50 g/cm³ para o Cedro indiano (PRADO *et al.*, 2003; HONORATO *et al.*, 2005; TRIANOSKI, 2010; SUIREZS *et al.*, 2015).

A ABNT NBR 7190-1 (2022) sugere que, preferencialmente, a densidade aparente a 12% das espécies de madeiras para uso em elementos de MLC deve ser entre 0,40 g/m³ e 0,75 g/m³, para que a colagem das lamelas seja realizada de forma eficiente.

Analisando os valores de retratibilidade, para ambas as espécies de madeira, observou-se que o sentido tangencial ($\epsilon_{r,3}$) apresentou valores superiores aos obtidos para o sentido radial ($\epsilon_{r,2}$), e estes, por sua vez, apresentaram valores bem maiores que no sentido longitudinal ($\epsilon_{r,1}$), sendo, portanto, $\epsilon_{r,3} > \epsilon_{r,2} \gg \epsilon_{r,1}$. Os resultados no plano transversal ($\epsilon_{r,2}$ e $\epsilon_{r,3}$) das espécies apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si.

Os coeficientes de anisotropia (CA) indicaram que tanto a madeira de Cedro australiano quanto a de Cedro indiano possuem a mesma probabilidade de apresentarem trincas e rachaduras devido à variação de umidade. Segundo Mascia (2015), os valores próximos de 1 indicam uma estabilidade dimensional ideal.

5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ESPÉCIES

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados médios das propriedades mecânicas das madeiras utilizadas na confecção dos elementos de MLC: resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,m}$), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,m}$), módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{c0,m}$) e na flexão estática (MOE), e resistência característica à compressão paralela as fibras ($f_{c0,k}$).

Tabela 11 – Resultados da caracterização mecânica do Cedro australiano e indiano, U = 12%.

Propriedades	Cedro australiano ^{1,2}	Cedro indiano ^{1,2}
$f_{c0,m}$ (MPa)	29,11 ± 2,40 B (8,25%)	39,79 ± 3,79 A (9,51%)
$f_{v0,m}$ (MPa)	9,61 ± 1,52 B (15,82%)	11,68 ± 1,57 A (13,49%)
$E_{c0,m}$ (MPa)	6636,28 ± 1087,01 B (16,38%)	9762,40 ± 915,59 A (9,38%)
MOE (MPa)	7140,20 ± 1231,85 B (17,25%)	8450,01 ± 2762,46 A (32,69%)
$f_{c0,k}$ (MPa)	28,25	38,51

¹ Valor médio ± desvio padrão. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na horizontal, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Com os valores de resistência à compressão paralela às fibras característica foi definida a classe de resistência das espécies, de acordo com o especificado pela ABNT NBR 7190-1 (2022) para madeiras dicotiledôneas. A classe de resistência do lote analisado de Cedro australiano (*Toona ciliata*) foi D20 e do Cedro indiano (*Acrocarpus fraxinifolius*) foi D30.

5.3 RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES DAS LAMELAS

A Tabela 12 apresenta os valores médios das rugosidades superficiais médias (Ra), os desvios padrão, os coeficientes de variação, como também os resultados dos testes de Tukey para as lamelas de madeira de Cedro australiano e Cedro indiano, submetidas à diferentes tipos de acabamentos de superfície obtidos pela plaina desgrossadeira e pelos lixamentos.

Tabela 12 – Valores de rugosidade superficial média (Ra) para as lamelas de madeira.

Acabamento	Cedro australiano		Cedro indiano	
	Ra (μm) ¹	Tukey ²	Ra (μm) ¹	Tukey ²
Plaina	3,14 $\pm$ 0,16 (5,09%)	A	2,21 $\pm$ 0,25 (11,31%)	A
Lixa 80	2,75 $\pm$ 0,18 (6,54%)	B	1,71 $\pm$ 0,15 (8,77%)	B
Lixa 120	1,75 $\pm$ 0,08 (4,57%)	C	1,43 $\pm$ 0,13 (9,09%)	C
Lixa 220	1,20 $\pm$ 0,07 (5,83%)	D	1,11 $\pm$ 0,08 (7,20%)	D

¹ Valor médio $\pm$ desvio padrão. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

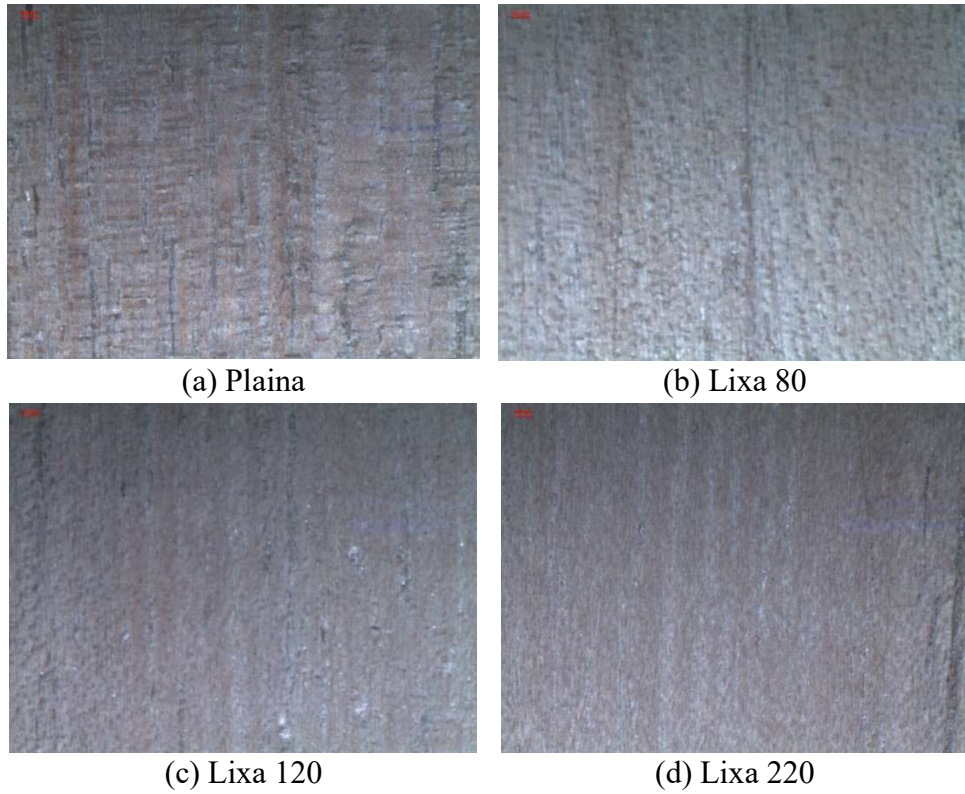
Fonte: Autoria própria.

O teste de Tukey mostrou que, para ambas as madeiras, as rugosidades superficiais médias (Ra) apresentaram diferenças significativas entre os quatro acabamentos realizados.

Observou-se também que conforme houve aumento na gramatura da lixa utilizada, a rugosidade da superfície diminuiu. Esse resultado já era esperado, pois, quanto maior a gramatura da lixa utilizada menor deve ser a rugosidade obtida para a superfície da lamela.

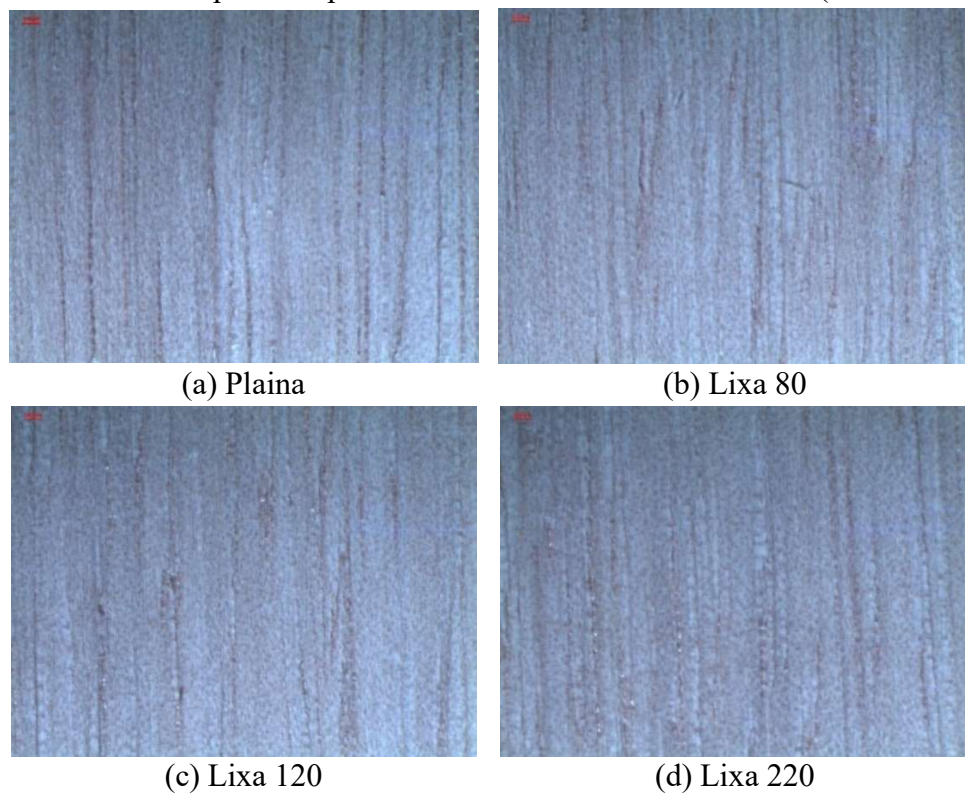
As Figuras 46 e 47 apresentam uma avaliação visual dos resultados apresentados na Tabela 12, utilizando imagens obtidas por meio de microscopia óptica de luz refletida, com um aumento de 10x (escala: 500 μm), das superfícies das lamelas das madeiras de Cedro australiano e indiano para os 4 acabamentos analisados (plaina, lixamento com lixa 80, 120 e 220).

Figura 46 – Microscopia da superfície das lamelas de Cedro australiano (escala: 500 μm).



Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Microscopia da superfície das lamelas de Cedro indiano (escala: 500 μm).



Fonte: Autoria própria.

Nas imagens ampliadas é possível observar visualmente, de forma clara, que houve uma diminuição na rugosidade da superfície da madeira de Cedro australiano a partir do aumento da granulometria das lixas utilizadas, com as imagens das superfícies bem mais homogêneas e regularizadas. Para a madeira de Cedro indiano, as diferenças obtidas nas 4 superfícies foram mais sutis, não sendo tão visível nas imagens, assim como apontado pelos resultados do rugosímetro.

Essa maior diferença no acabamento das lamelas da madeira de Cedro australiano pode ser explicada pela presença de grã média a levemente reversa na madeira, justificando assim uma melhora maior na rugosidade com o aumento da granulometria das lixas, diferente do que acontece com o Cedro indiano, que já possuía uma superfície mais homogênea.

5.4 ANÁLISE DA INTERFACE MADEIRA-ADESIVO

As imagens de microscopia óptica da interface madeira-adesivo nas diferentes combinações permitiram observar a espessura e a uniformidade da linha de cola.

Nas Tabelas 13 e 14 são apresentados os valores médios das espessuras da linha de cola obtidos, juntamente com o teste de Tukey, o desvio padrão, o coeficiente de variação, e as espessuras máximas e mínimas das vigas de MLC de Cedro australiano e Cedro indiano, respectivamente.

Tabela 13 – Resultados da espessura das linhas de cola das vigas de Cedro australiano.

Comb.	Espessura da linha (μm) ^{1,2}	Max/Min (μm)	Comb.	Espessura da linha (μm) ^{1,2}	Max/Min (μm)
AP-P	75,61 $\pm$ 20,76 A (27,46%)	132,70 28,44	AF-P	91,87 $\pm$ 40,04 A (43,58%)	155,88 33,18
AP-80	63,76 $\pm$ 12,04 B (18,88%)	90,05 42,65	AF-80	82,65 $\pm$ 20,33 A (24,60%)	132,70 56,87
AP-120	38,34 $\pm$ 6,52 C (17,01%)	56,87 28,44	AF-120	72,27 $\pm$ 17,70 B (24,49%)	104,27 37,91
AP-220	29,95 $\pm$ 4,48 C (14,96%)	42,65 23,70	AF-220	58,59 $\pm$ 15,84 B (27,05%)	79,53 37,18

¹ Valor médio $\pm$ desvio padrão. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 – Resultados da espessura das linhas de cola das vigas de Cedro indiano.

Comb.	Espessura da linha (μm) ^{1,2}	Max/Min (μm)	Comb.	Espessura da linha (μm) ^{1,2}	Max/Min (μm)
IP-P	93,93 $\pm$ 13,13 A (13,98%)	118,48 56,87	IF-P	78,85 $\pm$ 14,81 A (18,79%)	104,27 56,87
IP-80	50,19 $\pm$ 11,94 B (23,79%)	71,09 28,44	IF-80	70,37 $\pm$ 10,40 A (14,79%)	90,05 51,09
IP-120	37,96 $\pm$ 8,85 C (23,30%)	52,13 23,70	IF-120	46,29 $\pm$ 10,08 B (21,77%)	66,35 23,18
IP-220	33,97 $\pm$ 7,54 C (22,19%)	43,39 22,10	IF-220	42,65 $\pm$ 9,26 B (21,728%)	52,13 21,70

¹ Valor médio $\pm$ desvio padrão. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Observou-se que houve tendência de diminuição da espessura da linha de cola em função do melhor acabamento da superfície das lamelas para as duas espécies analisadas, tanto para os elementos produzidos com adesivo AG101 (combinações AP e IP) quanto para o adesivo Cascophen RS-216-M (combinações AF e IF). As linhas de cola ficaram mais espessas nos elementos de MLC fabricadas com lamelas apenas aplainadas (sem lixamento) para ambas as espécies e adesivos estudados.

A redução na espessura da linha de cola nas lamelas com melhor acabamento superficial pode ser resultado do aumento da molhabilidade do adesivo na superfície das lamelas, facilitando a penetração e formando uma linha de cola mais delgada. Outro fator que pode ter contribuído para este comportamento foi a exposição dos elementos vasculares, fibras, poros e espaços vazios da superfície da madeira durante o lixamento.

Observou-se também que a espessura das linhas de cola dos elementos produzidos com o adesivo resorcinol-formaldeído, em geral, foi maior que para o adesivo poliuretano. Essa formação de linha de cola mais espessa para o adesivo resorcinol-formaldeído pode estar relacionada à alta viscosidade do adesivo, uma vez que, adesivos mais viscosos possuem maior dificuldade de espalhamento devido à menor fluidez, e consequentemente há menor penetração na estrutura da madeira. O adesivo Cascophen RS-216-M apresentou viscosidade de 5574 cP, valor bem superior ao do adesivo poliuretano AG101 com viscosidade de 1997 cP.

Para os elementos de MLC produzidos com o adesivo Cascophen RS-216-M e acabamento superficial das lamelas obtidos apenas com o aplainamento (sem lixamento), os valores de espessura média da linha de cola foram de 91,87 μm para o Cedro australiano e 78,85

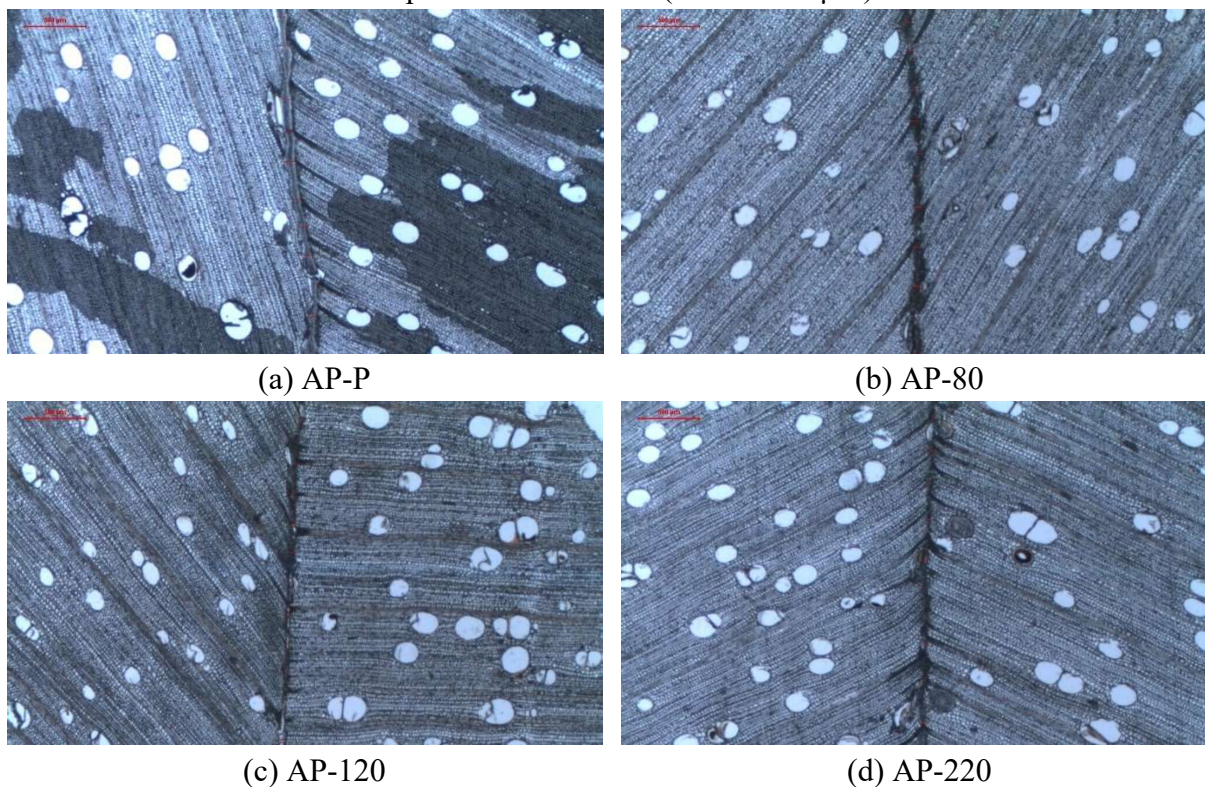
μm para o Cedro indiano. Cavalheiro (2018) obteve espessura média de $100\ \mu\text{m}$ para MLC de Paricá, e Segundinho *et al.* (2017) de $80,31\ \mu\text{m}$ para MLC de Eucalipto, ambos utilizando o adesivo Cascophen RS-216-M, valores próximos aos encontrados no presente trabalho.

Em outros estudos realizados com elementos de MLC fabricados com madeira de Eucalipto os autores encontraram espessuras da linha de cola variando de $7\ \mu\text{m}$ a $270\ \mu\text{m}$, e concluíram que a espessura varia de acordo com a espécie, pressão de colagem e pela gramatura utilizada para o adesivo (SERRANO, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Não existe normatização específica que indique a espessura da linha de cola a ser utilizada em elementos de MLC. Entretanto, segundo Vick (1999), os compósitos à base de madeira que apresentam as maiores resistências às cargas mecânicas e às variações dimensionais possuem espessuras de linha de cola variando entre $76\ \mu\text{m}$ e $152\ \mu\text{m}$.

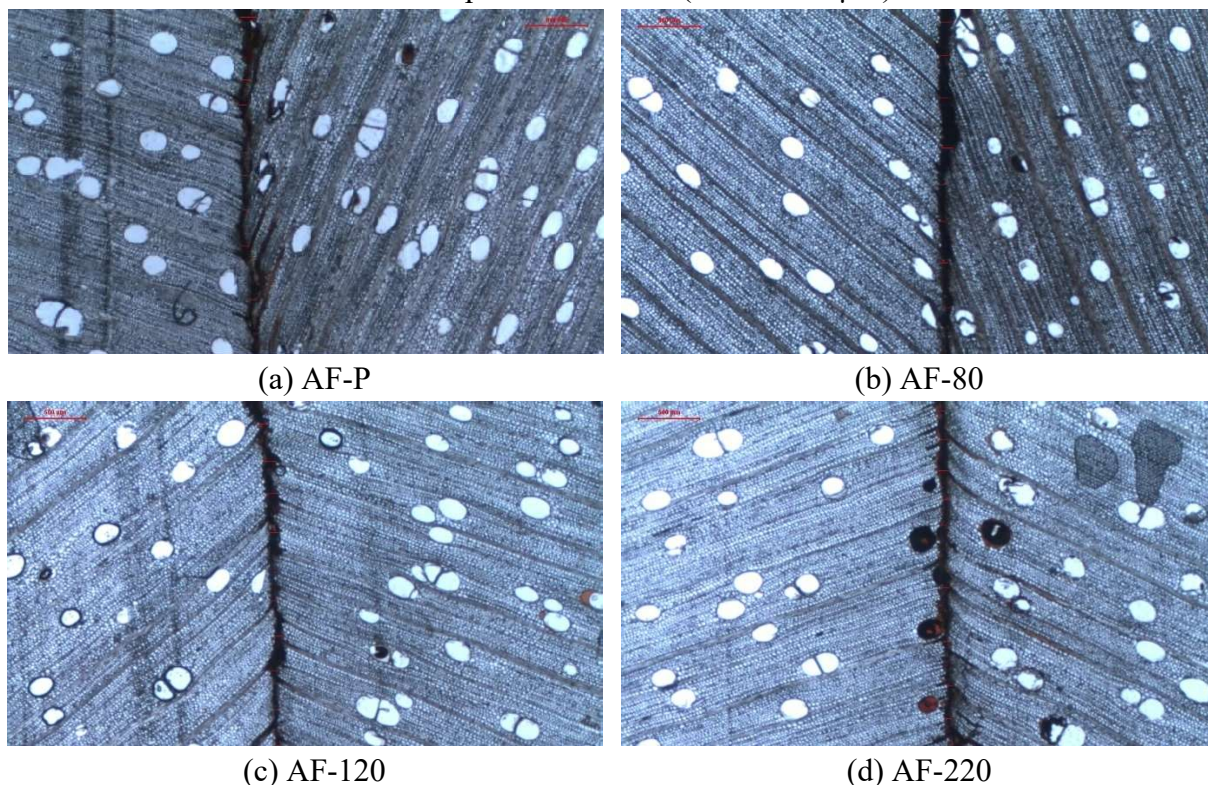
As Figuras 48 e 49 apresentam as imagens obtidas pelo microscópio óptico com luz transmitida, referente aos elementos de MLC produzidos com madeira de Cedro australiano com adesivo poliuretano AG101 (combinações AP) e com o adesivo Cascophen RS-216-M (combinações AF), respectivamente.

Figura 48 – Interface madeira-adesivo dos elementos de MLC de Cedro australiano colado com poliuretano AG101 (Escala $500\ \mu\text{m}$).



Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – Interface madeira-adesivo dos elementos de MLC de Cedro australiano colado com Cascophen RS-216-M (Escala 500 μm).



Fonte: Autoria própria.

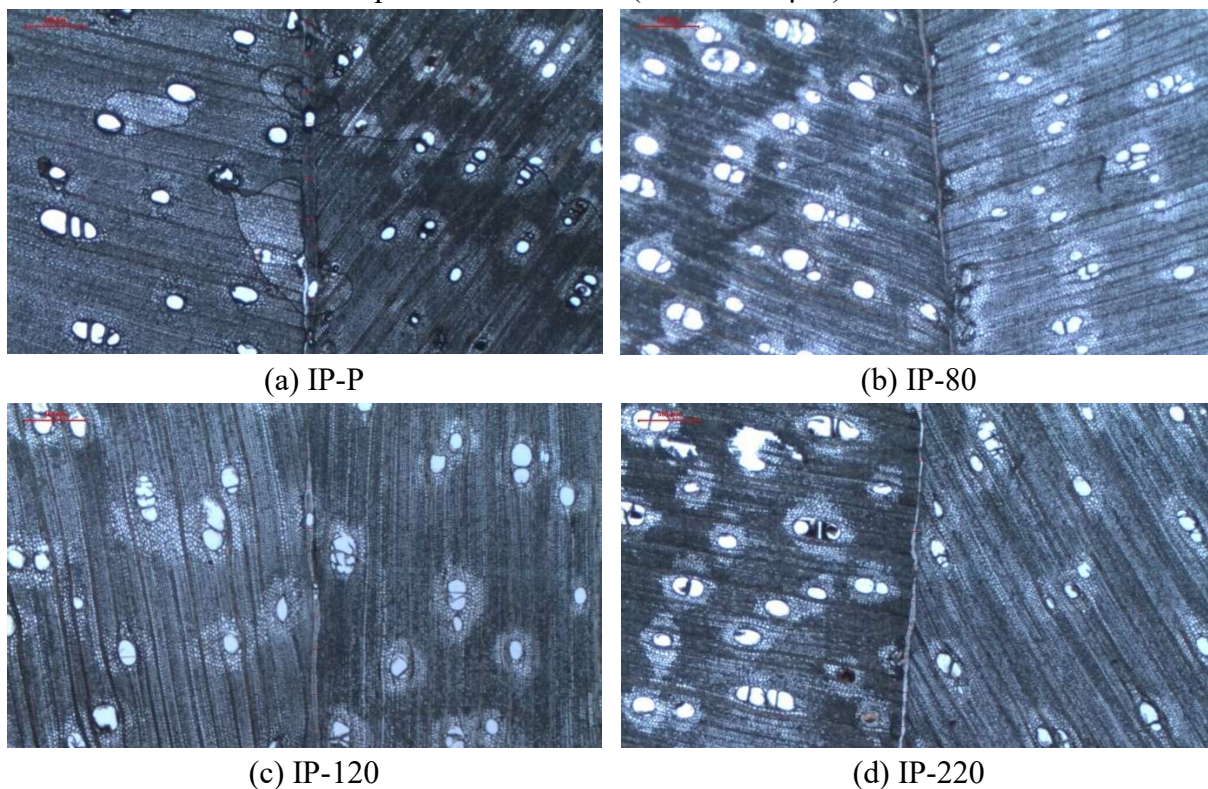
Da Figura 49, observa-se que nas amostras produzidas com o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS-216-M, característico pela sua coloração avermelhada intensa, foi possível visualizar facilmente a linha adesiva pura, e, em alguns pontos, a penetração do adesivo nos elementos vasculares, nas fibras e nos raios.

Porém, não foi possível diferenciar claramente a penetração do adesivo da madeira nas regiões de interfase, dificultando a interpretação e quantificação da profundidade da penetração e do espalhamento do adesivo na madeira nos diferentes acabamentos superficiais das lamelas.

Nas amostras produzidas com o adesivo poliuretano AG101 (Figura 48) essa visualização foi limitada pela coloração do adesivo, sendo possível identificar a linha de cola pura, mas não a penetração do adesivo nas diferentes estruturas da madeira.

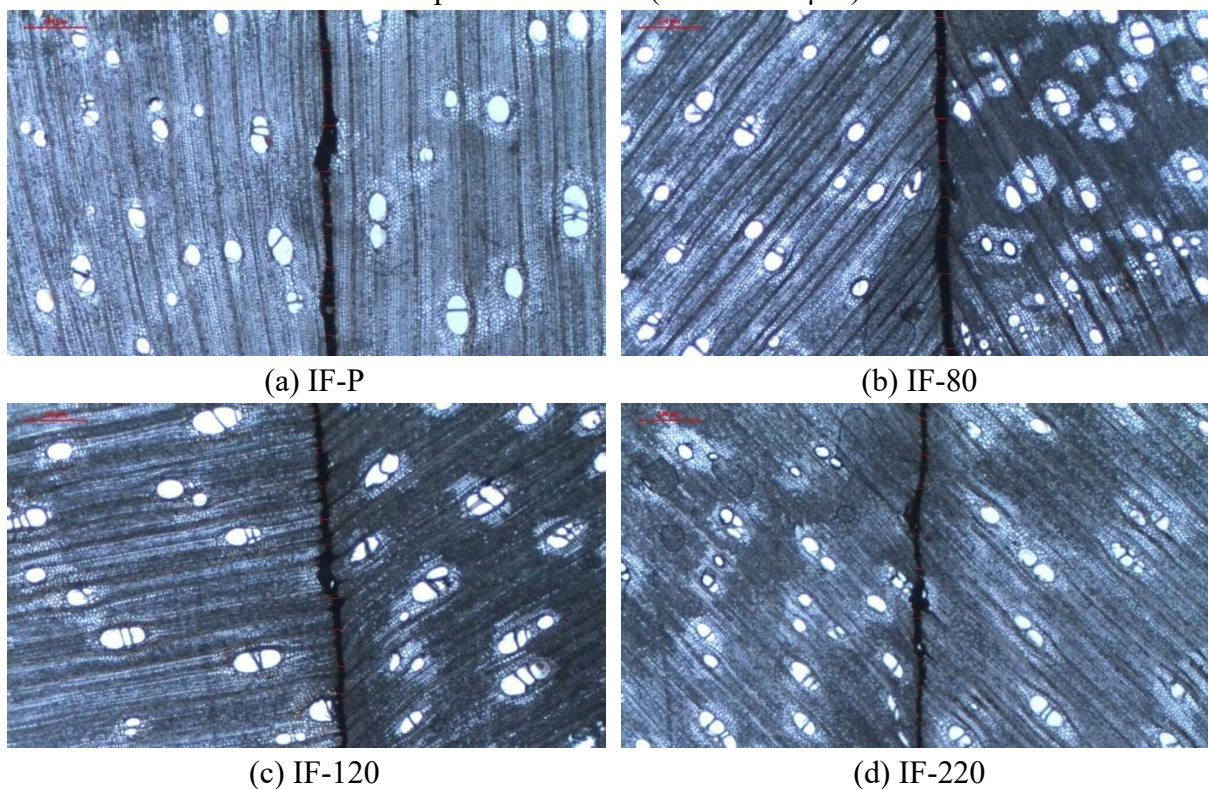
As Figuras 50 e 51 apresentam as imagens obtidas pelo microscópio óptico com luz transmitida, referente aos elementos de MLC produzidos com madeira de Cedro indiano com adesivo poliuretano AG101 (combinações AP) e com o adesivo Cascophen RS-216-M (combinações AF), respectivamente.

Figura 50 – Interface madeira-adesivo dos elementos de MLC de Cedro indiano colado com poliuretano AG101 (Escala 500 μm).



Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – Interface madeira-adesivo dos elementos de MLC de Cedro indiano colado com Cascophen RS-216-M (Escala 500 μm).



Fonte: Autoria própria.

Para os elementos de MLC de Cedro indiano produzidos com o adesivo poliuretano AG101 (Figura 50) foi possível identificar apenas a linha de cola pura, mas não a penetração do adesivo nas diferentes estruturas da madeira.

Para amostras produzidas com o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen (Figura 51), também podemos observar apenas a linha adesiva pura, não sendo possível observar a penetração do adesivo nas estruturas da madeira, mesmo sendo um material de coloração avermelhada intensa.

Para todas as combinações madeira-adesivo-acabamento não se observou a formação de bolhas de ar, cristais ou tensão residual, os defeitos observados na linha de cola são decorrentes dos cortes realizados pelo micrótomo.

5.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA

Todos os dados para as combinações espécie-adesivo-acabamento obtiveram *p-value* > 0,05, com base no teste de *Anderson-Darling*, indicando a normalidade dos dados, validando assim os resultados da análise de variância (ANOVA). Os resultados do teste de Tukey, apresentados abaixo, foram obtidos a partir da análise do fator “acabamento superficial” (As) de forma isolada.

A Tabela 15 apresenta os valores médios de resistência ao cisalhamento da linha de cola ($f_{v,m}$), ordenados do maior para o menor valor obtido, o desvio padrão e o coeficiente de variação para as combinações adesivo-acabamento das madeiras de Cedro australiano.

Tabela 15 – Resistências ao cisalhamento das linhas de cola para os elementos de MLC fabricados com Cedro australiano.

Combinação	$f_{v,m}$ (MPa) ¹	Tukey ²	Combinação	$f_{v,m}$ (MPa) ¹	Tukey ²
AP-P	5,79 ± 0,42 (7,27%)	A	AF-120	6,07 ± 0,38 (6,26%)	A
AP-220	5,36 ± 1,19 (22,24%)	A	AF-220	5,77 ± 0,42 (6,93%)	AB
AP-80	5,02 ± 0,34 (6,77%)	A	AF-80	5,36 ± 0,41 (7,65%)	BC
AP-120	5,01 ± 0,27 (5,39%)	A	AF-P	5,27 ± 0,04 (0,75%)	C

¹ Valor médio ± desvio padrão. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Após análise da Tabela 15, observou-se que não existiram grandes diferenças entre as condições de lixamento e a amostra de referência (sem lixamento), no que se refere ao valor da resistência ao cisalhamento das linhas de cola.

Para os elementos produzidos com Cedro australiano e resina poliuretana AG101 (combinações AP), houve diminuição de cerca de 7% a 13% na resistência ao cisalhamento em relação a amostra de referência, porém nenhuma das combinações (AP-P, AP-80, AP-120 e AP-220) apresentaram diferença significativas entre eles.

Por outro lado, os elementos produzidos com Cedro australiano e adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS-216-M (combinações AF), apresentaram diferenças significativas somente entre a combinação AF-120 e a referência AF-P, com aumento de 15,18% no valor de resistência, mas sem diferenças significativas entre as combinações AF-120 e AF-220, como também entre a combinação AF-80 e a referência AF-P.

A Tabela 16 apresenta os valores médios de resistência ao cisalhamento da linha de cola ($f_{v,m}$), ordenados do maior para o menor valor obtido, o desvio padrão e o coeficiente de variação para as combinações adesivo-acabamento das madeiras de Cedro indiano.

Tabela 16 – Resistências ao cisalhamento das linhas de cola para os elementos de MLC fabricados com Cedro indiano.

Combinação	$f_{v0,m}$ (MPa) ¹	Tukey ²	Combinação	$f_{v0,m}$ (MPa) ¹	Tukey ²
IP-220	6,56 ± 1,31 (19,97%)	A	IF-P	6,88 ± 0,76 (11,05%)	A
IP-120	6,08 ± 0,53 (8,72%)	A	IF-80	6,63 ± 1,36 (20,51%)	A
IP-80	5,75 ± 1,27 (22,07%)	A	IF-220	5,93 ± 1,97 (33,22%)	A
IP-P	4,84 ± 0,65 (13,43%)	B	IF-120	5,71 ± 1,32 (23,12%)	A

¹ Valor médio ± desvio padrão. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Analisando a Tabela 16 foi observado que os elementos produzidos com Cedro indiano e adesivo poliuretano AG101 (combinações IP) apresentaram aumentos significativos, entre 19% e 35% na resistência, para as combinações IP-220, IP-120 e IP-80 em comparação com a sem lixamento (IP-P), porém não apresentaram diferenças significativas entre elas.

Para os elementos produzidos com Cedro indiano e adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS-216-M (combinações IF) foi observado que houve diminuição variando entre

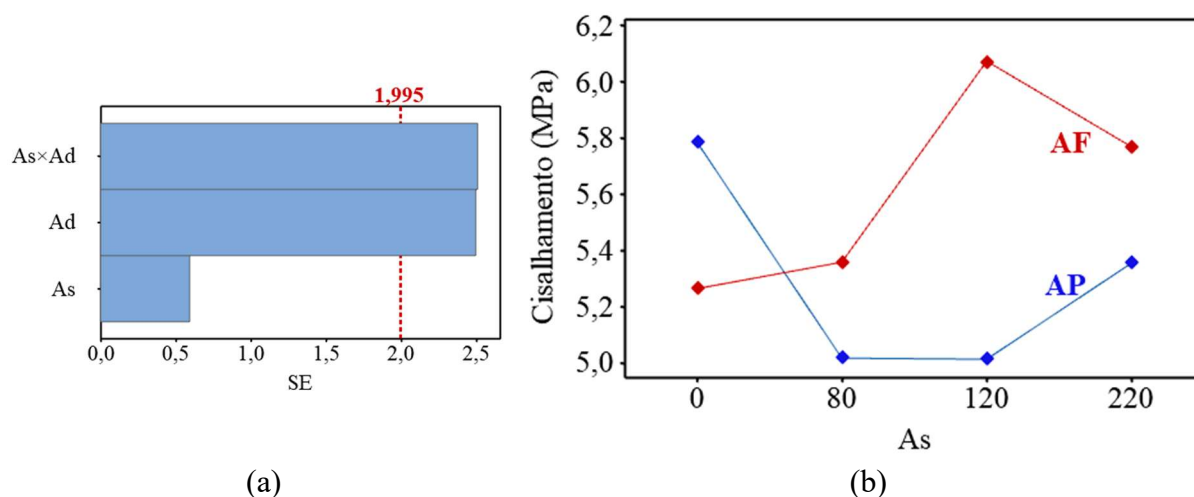
17% e 4% nos valores obtidos em relação a amostra de referência (IF-P), porém nenhuma das combinações (IF-P, IF-80, IF-120 e IF-220) apresentaram diferenças significativas no que se refere ao valor médio da resistência ao cisalhamento das linhas de cola.

Portanto, de forma geral, a partir da análise dos resultados médios (Tabelas 15 e 16), obtidos para as resistências ao cisalhamento das linhas de cola, para as combinações espécie-adesivo-acabamento avaliadas, não fica claro que existiram diferenças relevantes entre as condições de lixamento das lamelas e a condição de referência (sem lixamento). Conclusão semelhante foi observada por Serrano (2013) no que se refere à eficiência adesiva para madeiras de *Eucalyptus grandis* colados com adesivo monocomponente Jowapur.

Da ANOVA, a interação entre os dois fatores (Ad x As) foi considerada significativa para o cisalhamento das linhas de cola dos elementos de MLC produzidos com as duas espécies de madeira (Cedro australiano e indiano).

As Figuras 52 e 53 apresentam os gráficos de Pareto e de interação entre os fatores considerados significativos pela ANOVA para a resistência ao cisalhamento das linhas de cola dos elementos de MLC de Cedro australiano e Cedro indiano, respectivamente.

Figura 52 – (a) Gráfico de Pareto e (b) Gráfico de interação da resistência ao cisalhamento das linhas de cola dos elementos de MLC de Cedro australiano.



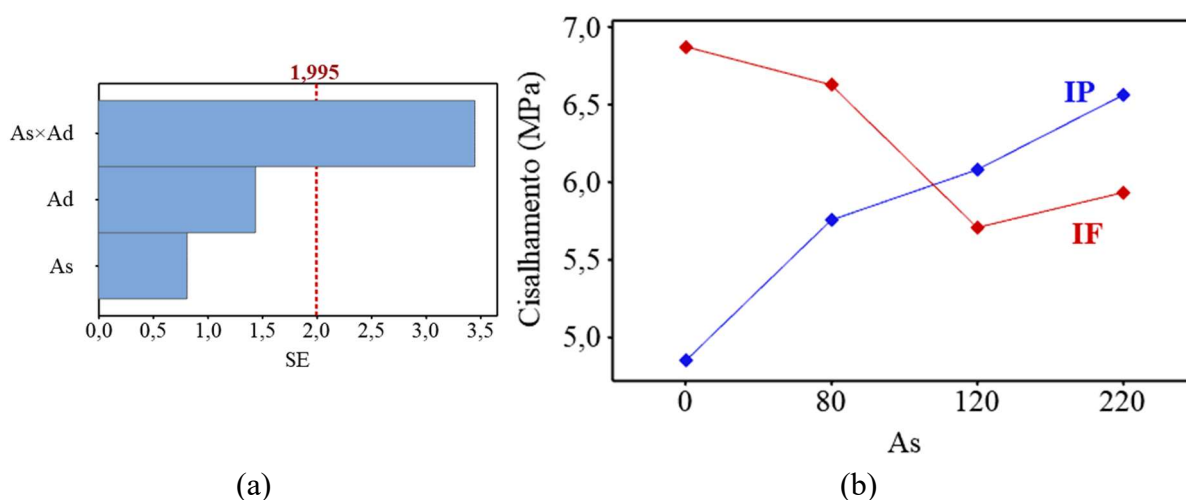
Fonte: Autoria própria.

Da Figura 52a, constatou-se a significância da interação dos dois fatores (As x Ad) na resistência ao cisalhamento, e que o tipo de adesivo (Ad) também afetou essa propriedade de forma significativa.

Na Figura 52b foi possível observar que, para o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS-216-M (combinações AF), o lixamento da superfície das lamelas resultou em

aumentos na resistência ao cisalhamento das linhas de cola de forma estatisticamente significativa, como apresentado na Tabela 15, porém, para o adesivo poliuretano AG101 (combinações AP) houve diminuição na resistência sem diferenças significativas entre os diferentes acabamentos, evidenciando que o adesivo utilizado influenciou nos resultados obtidos no estudo.

Figura 53 – (a) Gráfico de Pareto e (b) Gráfico de interação da resistência ao cisalhamento das linhas de cola dos elementos de MLC de Cedro indiano.



Fonte: Autoria própria.

Da Figura 53a, observou-se que houve significância da interação dos dois fatores na resistência ao cisalhamento, porém, para os elementos de MLC produzidos com Cedro indiano, nenhum dos fatores isolados foram considerados significativos.

Observou-se na Figura 53b que o melhor acabamento da superfície de colagem resultou em aumento na resistência ao cisalhamento das linhas de cola do MLC produzindo com o adesivo poliuretano AG101 (combinações IP) e redução da propriedade com os produzidos com adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS-216-M (combinações IF), porém, como apresentado na Tabela 16, os resultados não apresentaram diferenças significativas para nenhum dos adesivos utilizados.

5.5.1 Análise dos modos de ruptura nas regiões de colagem

A Tabela 17 apresenta os resultados médios das porcentagens de ruptura na madeira e no adesivo, obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento das linhas de cola, para as regiões de colagem dos elementos de MLC, produzidos com a madeira de Cedro australiano.

Tabela 17 – Modos de ruptura nas regiões de colagem dos elementos de Cedro australiano.

Combinação	Ruptura predominante		Combinação	Ruptura predominante	
	Madeira ¹ (%)	Tukey ²		Madeira ¹ (%)	Tukey ²
AP-P	87,80	A	AF-120	85,10	A
AP-220	83,20	B	AF-220	82,40	B
AP-80	79,50	C	AF-80	78,60	C
AP-120	77,00	C	AF-P	75,80	D

¹ A porcentagem de ruptura na madeira é complementar à % de ruptura no adesivo para a região de colagem

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Para todas as combinações espécie-adesivo-acabamento da Tabela 17, a predominância de ruptura na região de colagem ocorreu na madeira, indicando a boa qualidade de colagem para todos os casos analisados.

Os elementos produzidos com Cedro australiano e adesivo poliuretana AG101 (combinações AP), apresentaram redução da porcentagem de ruptura na madeira para as condições de lixamento AP-80, AP-120 e AP-220 com relação a situação de referência AP-P (sem lixamento), sendo esta redução estatisticamente significativa.

Por outro lado, os elementos produzidos com Cedro australiano e adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS-216-M (combinações AF), apresentaram aumento da porcentagem de ruptura na madeira para as combinações AF-80, AF-120 e AF-220 com relação a situação de referência AF-P (sem lixamento), sendo estes aumentos estatisticamente significativos.

A Tabela 18 apresenta os resultados médios das porcentagens de ruptura na madeira e no adesivo para os elementos de MLC produzidos com a madeira de Cedro indiano.

Tabela 18 – Modos de ruptura nas regiões de colagem dos elementos de Cedro indiano.

Combinação	Ruptura predominante		Combinação	Ruptura predominante	
	Madeira ¹ (%)	Tukey ²		Madeira ¹ (%)	Tukey ²
IP-220	83,10	A	IF-P	86,40	A
IP-120	81,90	A	IF-80	82,00	B
IP-80	78,50	B	IF-220	77,20	C
IP-P	76,30	B	IF-120	75,50	C

¹ A porcentagem de ruptura na madeira é complementar à % de ruptura no adesivo para a região de colagem

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Para todas as combinações espécie-adesivo-acabamento da Tabela 18, a predominância de ruptura na região de colagem também ocorreu na madeira, indicando a boa qualidade de colagem para todos os casos analisados.

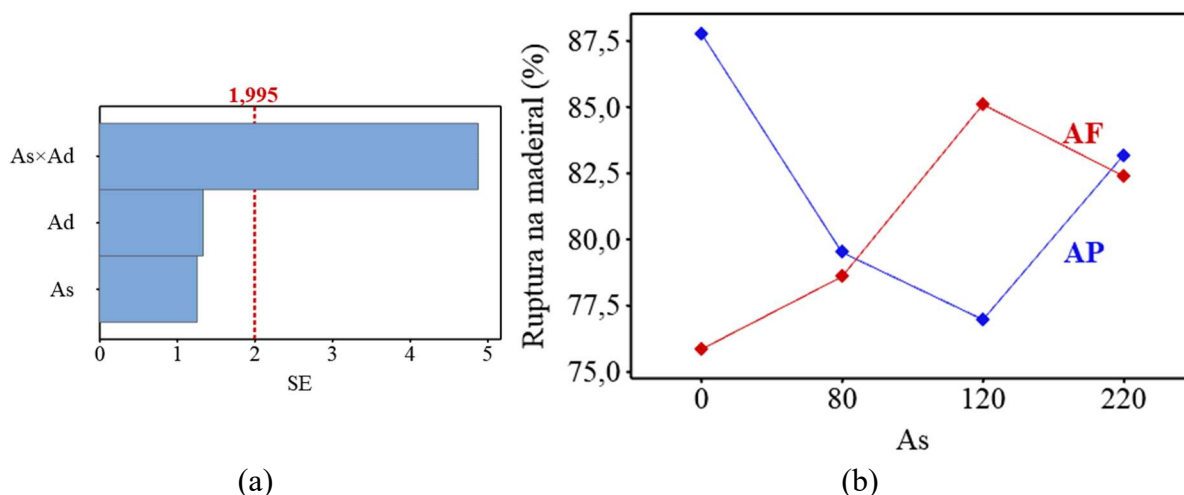
Os elementos produzidos com Cedro indiano e adesivo poliuretana AG101 (combinações IP), apresentaram aumento da porcentagem média de ruptura na madeira para as combinações IP-80, IP-120 e IP-220 com relação a situação de referência IP-P (sem lixamento). No entanto, esse aumento só foi significativo estatisticamente para as combinações IP-120 e IP-220.

Por outro lado, os elementos produzidos com Cedro indiano e adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen (combinações IF), apresentaram redução da porcentagem de ruptura na madeira para as combinações IF-80, IF-120 e IF-220 com relação a situação de referência IF-P (sem lixamento), sendo esta redução estatisticamente significativa.

Na literatura não foram encontrados valores da porcentagem ruptura na madeira para as duas espécies de cedro analisadas nesse estudo. Porém, para o adesivo resorcinol-formaldeído, Plaster *et al.* (2008) encontraram o valor médio de ruptura na madeira de 74,41% para MLC de *Eucalyptus spp*, e Segundinho *et al.* (2017) obtiveram valor médio de ruptura na madeira de 44,17% para elementos de MLC de *Eucalyptus cloeziana* utilizando adesivo poliuretano.

As Figuras 54 e 55 apresentam os gráficos de Pareto e de interação entre os fatores considerados significativos pela ANOVA para a porcentagem de ruptura na madeira dos elementos de MLC de Cedro australiano e Cedro indiano, respectivamente.

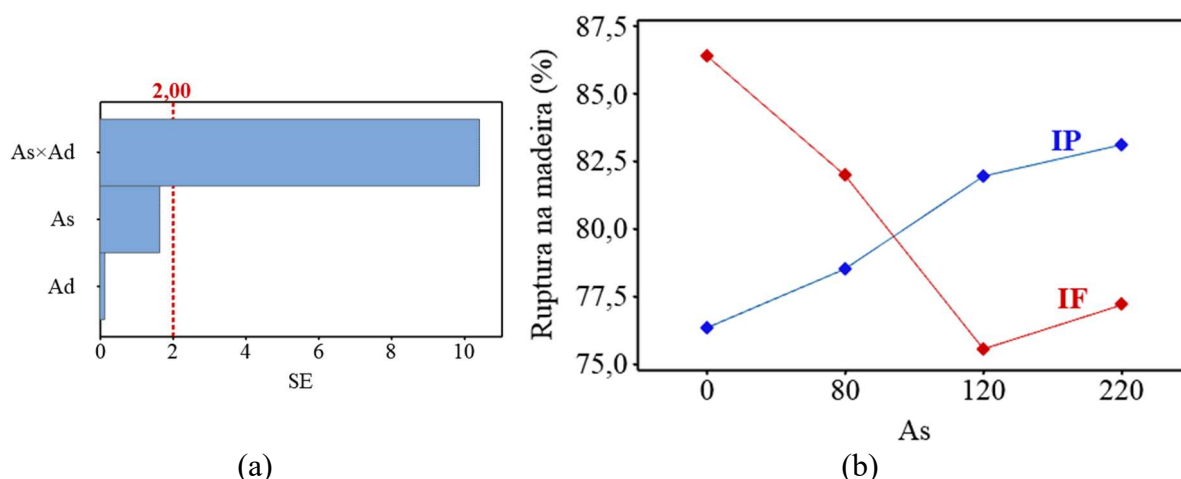
Figura 54 – (a) Gráfico de Pareto e (b) Gráfico de interação da porcentagem de ruptura na madeira dos elementos de MLC de Cedro australiano.



Fonte: Autoria própria.

Das Figuras 54a e 55a, temos que a interação entre os dois fatores (Ad x As) para a porcentagem de ruptura foi considerada significativa pela ANOVA para os elementos de MLC produzidos com as duas espécies de madeira, porém nenhum dos fatores isolados influenciou significativamente na ruptura da linha de cola dos materiais.

Figura 55 – (a) Gráfico de Pareto e (b) Gráfico de interação da porcentagem de ruptura na madeira dos elementos de MLC de Cedro indiano.



Fonte: Autoria própria.

5.6 DELAMINAÇÃO DAS LINHAS DE COLA

Neste item apresenta-se os resultados médios obtidos nos ensaios de delaminação para as combinações espécie-adesivo-acabamento. Verificou-se nesse caso se as referidas combinações apresentaram taxa de delaminação dentro do limite de 6% permitido para folhosas, para adesivos externos, segundo a ABNT NBR 7190-6 (2022).

A Tabela 19 apresenta os resultados médios de delaminação (Dt) para os elementos de MLC confeccionados com madeiras de Cedro australiano, calculadas conforme Equação (2), ordenados da menor porcentagem de delaminação para a maior.

Tabela 19 – Resultados médios de delaminação dos elementos de Cedro australiano.

Combinação	Dt (%)	Combinação	Dt (%)
AP-P	0,22	AF-P	0,29
AP-220	0,71	AF-220	0,99
AP-120	0,96	AF-120	1,02
AP-80	1,93	AF-80	1,98

Dt = Porcentagem de delaminação. Limite de delaminação segundo a ABNT NBR 7190-6 (2022) = 6%

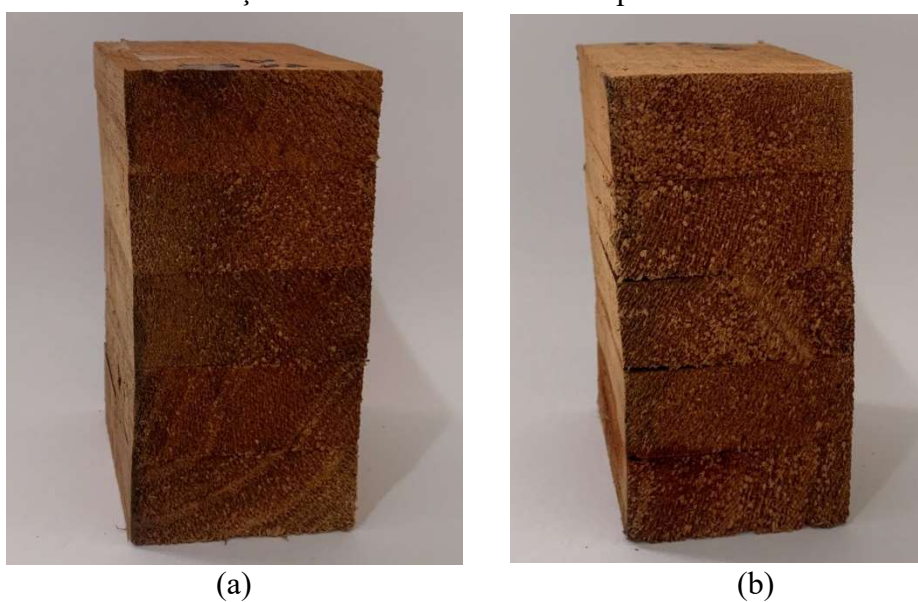
Fonte: Autoria própria.

Para os elementos de MLC confeccionados com Cedro australiano, a porcentagem de delaminação obtida para todas as combinações adesivo-acabamento ficaram abaixo de 6%. Porém, as amostras que tiveram as superfícies das lamelas apenas aplainadas (AP-P e AF-P) apresentaram as menores porcentagens de delaminação.

Também foi possível observar, neste caso, que os elementos confeccionados com o adesivo poliuretano AG101 (combinações AP) apresentaram menores porcentagens de delaminação que àqueles confeccionados com o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS-216-M (combinações AF). Porém, pode-se afirmar que os dois adesivos utilizados apresentaram comportamentos eficientes quando submetidos aos ensaios de delaminação da linha de cola.

A Figura 56 apresenta dos detalhes dos corpos de prova de Cedro australiano que passaram por ciclos de pressão e vácuo, seguidos de secagem forçada em climatizadora, para a análise da qualidade de colagem com relação a porcentagem de delaminação.

Figura 56 – Corpos de prova de Cedro australiano: (a) Sem sofrer delaminação, e (b) delaminação dentro do limite máximo permitido de 6%.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 20 apresenta os resultados médios de delaminação (D_t) para os elementos de MLC confeccionados com madeiras de Cedro indiano, calculadas conforme a Equação (2), ordenados da menor porcentagem de delaminação para a maior.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que os corpos de prova confeccionados com o adesivo poliuretano AG101 (combinações IP) apresentaram valores de delaminação próximos ao limite permitido, porém abaixo de 6% para todas as combinações. Além disso, observou-se

também que a diminuição da rugosidade superficial, ocasionada pelo lixamento da superfície das lamelas, diminuiu gradativamente a porcentagem de delaminação com relação a situação de referência sem lixamento (IP-P).

Tabela 20 – Resultados médios de delaminação dos elementos de Cedro indiano.

Combinação	Dt (%)	Combinação	Dt (%)
IP-220	4,90	IF-220	3,29
IP-120	5,18	IF-120	3,47
IP-80	5,37	IF-80	3,99
IP-P	5,53	IF-P	4,15

Dt = Porcentagem de delaminação. Limite de delaminação segundo a ABNT NBR 7190-6 (2022) = 6%

Fonte: Autoria própria.

Para que os corpos de prova confeccionados com o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen (combinações IF), também houve redução da porcentagem de delaminação com o lixamento (diminuição da rugosidade da superfície), que permaneceram com porcentagens de delaminação abaixo do máximo de 6%.

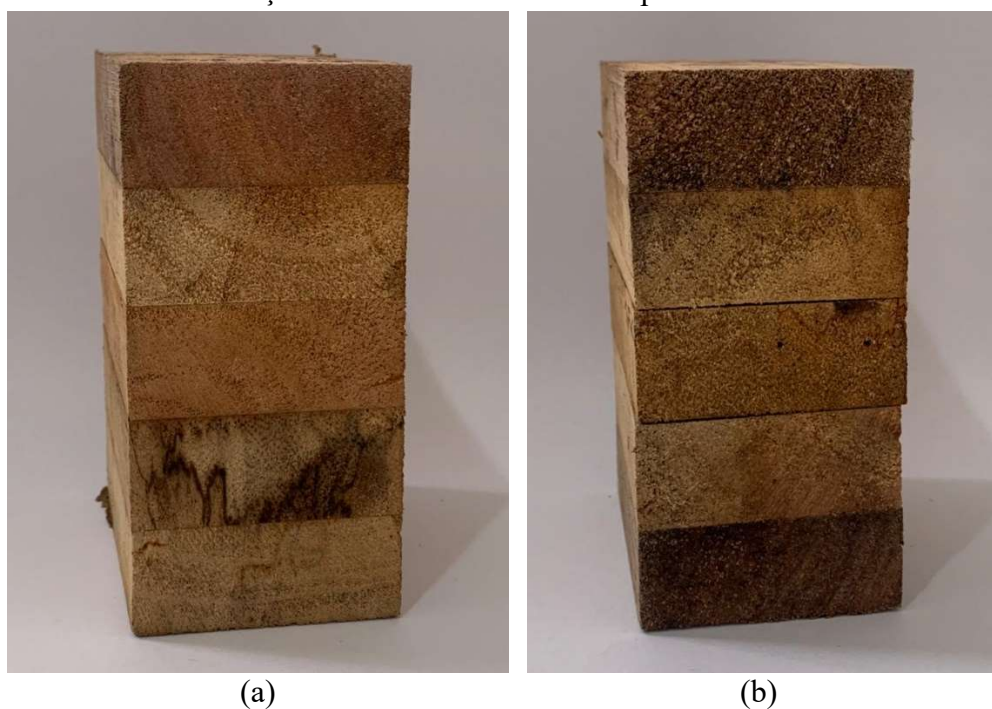
Os graus de delaminação total variaram de acordo com a espécie, sendo significativamente menores nos elementos de MLC confeccionados com a madeira de Cedro australiano (*Toona ciliata*). É importante salientar que as madeiras de Cedro australiano, nesta pesquisa, apresentaram valores médios de densidade aparente inferiores aos valores médios de densidade aparente das madeiras de Cedro indiano.

As porcentagens de delaminação mais altas obtidas para madeiras de Cedro indiano, na Tabela 20, podem estar associadas a dois principais fatores, além do lixamento, que são: (a) maior densidade da madeira (embora com estrutura anatômica semelhante - folhosa) que dificulta a penetração do adesivo nos poros das lamelas; (b) viscosidade do adesivo (quanto maior a viscosidade do adesivo menor será a sua capacidade de escoar e, consequentemente, de penetrar nos poros das superfícies das lamelas).

Analisando as Tabelas 14 e 20, observa-se que houve relação entre a espessura da linha de cola e a delaminação nos elementos de MLC produzidos com Cedro indiano, para os dois adesivos, onde o melhor acabamento da superfície das lamelas diminuiu a delaminação e resultou em linhas de cola de menor espessura. Essa relação não foi observada para os elementos de MLC produzidos com Cedro australiano (Tabelas 13 e 19).

A Figura 57 apresenta dos detalhes dos corpos de prova que passaram por ciclos de pressão e vácuo, seguidos de secagem forçada em climatizadora, para a análise da qualidade de colagem com relação a porcentagem de delaminação para corpos de prova de Cedro indiano.

Figura 57 – Corpos de prova de Cedro indiano: (a) Sem sofrer delaminação, e (b) delaminação dentro do limite máximo permitido de 6%.



Fonte: Autoria própria.

5.7 COMPARATIVO ENTRE MODO DE RUPTURA E DELAMINAÇÃO

A porcentagem de delaminação e resistência ao cisalhamento das linhas de cola são os principais fatores considerados na análise da qualidade de colagem de elementos de MLC.

Na Tabela 21 são apresentadas as relações entre as porcentagens de ruptura obtidas na madeira (para região de colagem dos corpos de prova, a partir dos ensaios de cisalhamento das linhas de cola) e as porcentagens de delaminação para as combinações adesivo-acabamento dos elementos de MLC produzidos com Cedro australiano.

A partir dos resultados, observou-se que os corpos de prova confeccionados com o adesivo poliuretano AG101 (combinações AP), apresentaram uma relação direta entre a porcentagem de delaminação e a porcentagem de ruptura na madeira na região adesiva. Essa tendência foi observada para os três níveis de acabamento (com lixa 80, 120 e 220) quando comparados com a condição de referência (sem lixamento).

Tabela 21 – Modos de ruptura nas regiões de colagem e porcentagem de delaminação dos elementos de Cedro australiano.

Comb.	Adesivo poliuretano		Comb.	Adesivo resorcinol-formaldeído	
	Ruptura na Madeira ¹ (%)	Delaminação (%)		Ruptura na Madeira ¹ (%)	Delaminação (%)
AP-P	87,80 A	0,22	AF-120	85,10 A	1,02
AP-220	83,20 B	0,71	AF-220	82,40 B	0,99
AP-80	79,50 C	1,93	AF-80	78,60 C	1,98
AP-120	77,00 C	0,96	AF-P	75,80 D	0,29

¹ Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Dentro deste contexto, uma melhor qualidade de colagem é garantida pela combinação de alta porcentagem de ruptura na madeira associada à baixa porcentagem de delaminação e vice-versa. Essa mesma tendência não foi observada para os elementos confeccionados com madeiras de Cedro australiano e adesivo resorcinol-formaldeído (combinações AF).

A Tabela 22 apresenta as relações entre as porcentagens de ruptura obtidas na madeira e as porcentagens de delaminação para as combinações adesivo-acabamento dos elementos de MLC de Cedro indiano.

Tabela 22 – Modos de ruptura nas regiões de colagem e porcentagem de delaminação dos elementos de Cedro indiano.

Comb.	Adesivo poliuretano		Comb.	Adesivo resorcinol-formaldeído	
	Ruptura na Madeira ¹ (%)	Delaminação (%)		Ruptura na Madeira ¹ (%)	Delaminação (%)
IP-220	83,10 A	4,90	IF-P	86,40 A	4,15
IP-120	81,90 A	5,18	IF-80	82,00 B	3,99
IP-80	78,50 B	5,37	IF-220	77,20 C	3,29
IP-P	76,30 B	5,53	IF-120	75,50 C	3,47

¹ Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados da Tabela 22, observou-se que os corpos de prova confeccionados com o adesivo poliuretano AG101 (combinações IP) apresentaram relação direta entre a porcentagem de delaminação e a porcentagem de ruptura na madeira na região adesiva. Essa tendência foi observada para os três níveis de acabamento (com lixa 80, 120 e 220) quando comparados com a condição de referência (sem lixamento) e de uma forma gradativa entre todos os níveis.

Essa mesma tendência, quando considerados os elementos confeccionados com adesivo Cascophen (combinações IF), só foi observada quando comparada a combinação de lixamento IF-80 com a condição de referência IF-P (sem lixamento), porém, os valores de delaminação para IF-220 e IF-120 também reduziram em comparação com IF-P e são muito próximos.

Neste caso, pode ter ocorrido a influência do adesivo AG101 correspondente à uma maior capacidade de escoamento (menor viscosidade) e, conseqüentemente, maior capacidade de penetração nos poros da superfície da lamela.

5.8 RESISTÊNCIA CONVENCIONAL À FLEXÃO DAS VIGAS

Todos os dados analisados obtiveram $p\text{-value} > 0,05$, com base no teste de *Anderson-Darling*, indicando a normalidade dos dados, validando assim os resultados da análise de variância (ANOVA). Da ANOVA, a interação entre os dois fatores (Ad x As) não foi considerada significativa para a rigidez (E_M) e nem para a resistência convencional à flexão (f_M) dos elementos de MLC produzidos com nenhuma das duas espécies de madeira estudadas (Cedro australiano e indiano).

A Tabela 23 apresenta os valores médios de rigidez (E_M) e resistência convencional à flexão (f_M), o desvio padrão e o coeficiente de variação para as combinações adesivo-acabamento das madeiras de Cedro australiano. Os resultados do teste de Tukey foram obtidos a partir da análise do fator “acabamento superficial” (As) de forma isolada.

Tabela 23 – Rigidez e resistência convencional à flexão dos elementos de MLC fabricados com Cedro australiano.

Amostra	Adesivo poliuretano		Amostra	Adesivo resorcinol-formaldeído	
	E_m (MPa) ^{1,2}	f_M (MPa) ^{1,2}		E_m (MPa) ^{1,2}	f_M (MPa) ^{1,2}
AP-P	7315 ± 375 A (5,13%)	49,78 ± 4,24 A (8,52%)	AF-P	7955 ± 320 A (4,02%)	53,43 ± 2,17 A (4,06%)
AP-80	6914 ± 474 A (6,86%)	46,62 ± 2,24 A (4,80%)	AF-80	7702 ± 591 A (7,67%)	49,06 ± 3,66 A (7,46%)
AP-120	7108 ± 378 A (5,33%)	46,01 ± 2,80 A (6,08%)	AF-120	7421 ± 842 A (11,35%)	43,59 ± 6,05 B (13,87%)
AP-220	6988 ± 371 A (5,32%)	45,55 ± 1,11 A (2,43%)	AF-220	7228 ± 337 A (4,67%)	45,94 ± 2,37 B (5,15%)

¹ Valor médio ± desvio padrão. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Da Tabela 23, tem-se que o tipo de acabamento superficial não afetou de forma significativa os valores da rigidez e da resistência convencional à flexão das amostras fabricadas com o adesivo poliuretano AG101 (combinações AP), observa-se também que houve diminuição de 3% a 5% nos valores obtidos quando foi melhorado o acabamento superficial das lamelas. Para o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen (combinações AF), o tipo de acabamento não afetou os valores da rigidez, entretanto, para os valores de resistência à flexão a influência foi estatisticamente significativa, com redução variando de 3% a 9%.

Observou-se que o acabamento gerado pela plaina (sem lixamento) e pela lixa 80 resultaram nos maiores valores de resistência (f_M) para os elementos de MLC produzidos pelos dois tipos de adesivos.

A Tabela 24 apresenta os resultados do teste de Tukey obtidos a partir da análise do fator “tipo de adesivo” (Ad) de forma isolada para a rigidez (E_M) e resistência à flexão (f_M) dos elementos de MLC de Cedro australiano.

Tabela 24 – Resultados do teste de Tukey do fator “tipo de adesivo” dos elementos de MLC fabricados com Cedro australiano.

Amostra	Tukey ¹		Amostra	Tukey ¹	
	E_M	f_M		E_m	f_m
AP-P	B	A	AP-120	A	A
AF-P	A	A	AF-120	A	A
AP-80	B	A	AP-220	A	A
AF-80	A	A	AF-220	A	A

¹ Letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Analisando a influência do tipo de adesivo em cada diferente acabamento, de forma individual, observa-se que as amostras com acabamento realizado pela plaina (AP-P e AF-P) e pela lixa 80 (AP-80 e AF-80) apresentaram diferenças significativas entre os dois tipos de adesivo nos valores de rigidez obtidos. Os demais acabamentos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas nos valores de rigidez e resistência convencional à flexão quando comparados os adesivos utilizados na sua fabricação.

Sendo assim, para os acabamentos realizados com a plaina e lixa 80, os elementos de MLC produzidos com adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen (combinações AF) apresentaram melhores resultados de rigidez.

A Tabela 25 apresenta os valores médios de rigidez (E_M) e resistência convencional à flexão (f_M), o desvio padrão e o coeficiente de variação para as combinações adesivo-

acabamento das madeiras de Cedro indiano. Os resultados do teste de Tukey foram obtidos a partir da análise do fator “acabamento superficial” (As) de forma isolada.

Tabela 25 – Rigidez e resistência convencional à flexão dos elementos de MLC fabricados com Cedro indiano.

Amostra	Adesivo poliuretano		Amostra	Adesivo resorcinol-formaldeído	
	E_M (MPa) ^{1,2}	f_M (MPa) ^{1,2}		E_M (MPa) ^{1,2}	f_M (MPa) ^{1,2}
IP-P	7951 ± 863 A (10,86%)	60,44 ± 4,66 A (7,72%)	IF-P	7959 ± 448 A (5,63%)	59,18 ± 1,43 A (2,41%)
IP-80	7347 ± 697 A (9,49%)	57,53 ± 4,83 A (8,39%)	IF-80	7596 ± 829 AB (10,92%)	59,05 ± 1,76 A (2,98%)
IP-120	7395 ± 239 A (3,24%)	59,74 ± 8,18 A (13,69%)	IF-120	7607 ± 577 AB (7,59%)	53,74 ± 7,13 B (13,27%)
IP-220	7440 ± 706 A (9,50%)	52,40 ± 5,37 A (10,25%)	IF-220	6522 ± 620 B (9,51%)	47,66 ± 9,50 B (19,94%)

¹ Valor médio ± desvio padrão. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

² Médias seguidas por letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

Da Tabela 25 observa-se que o tipo de acabamento superficial não afetou de forma significativa os valores da rigidez e da resistência à flexão das amostras fabricadas com o adesivo poliuretano AG101 (combinações IP). Para o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen (combinações IF), o tipo de acabamento influenciou significativamente os valores de rigidez e de resistência à flexão.

Observou-se, também, que o acabamento gerado pela plaina (sem lixamento) resultou nos maiores valores de rigidez (E_m) para os elementos de MLC produzidos pelas duas espécies de madeira, sendo possível notar que houve diminuição nos valores obtidos com o lixamento das lamelas. Essa diminuição foi de cerca de 7% para as combinações IP e de 4,5% a 18% para as combinações IF.

A Tabela 26 apresenta os resultados do teste de Tukey obtidos a partir da análise do fator “tipo de adesivo” (Ad) de forma isolada para a rigidez (E_M) e resistência à flexão (f_M) dos elementos de MLC de Cedro indiano.

Ao analisar a influência do tipo de adesivo em cada diferente acabamento, de forma individual, para os elementos de MLC de Cedro indiano, observou-se que não houve diferenças significativas nos valores de rigidez e resistência à flexão para nenhum dos acabamentos analisados ao comparar os adesivos utilizados na sua fabricação.

Tabela 26 – Resultados do teste de Tukey do fator “tipo de adesivo” dos elementos de MLC fabricados com Cedro indiano.

Amostra	Tukey ¹		Amostra	Tukey ¹	
	E _M	f _M		E _M	f _M
IP-P	A	A	IP-120	A	A
IF-P	A	A	IF-120	A	A
IP-80	A	A	IP-220	A	A
IF-80	A	A	IF-220	A	A

¹ Letras diferentes, na vertical, são significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autoria própria.

5.8.1 Análise dos modos de ruptura na flexão

Após os ensaios de flexão, foi realizado uma análise do modo de ruptura ocorrido em cada viga, nas quais foi possível constatar semelhança das rupturas de ambas as madeiras.

O processo de ruptura teve sua origem na região de compressão das vigas (lamela superior), com liberação de tensão máxima que avança para o rompimento das fibras mais tracionadas (lamela inferior). Para as lamelas superiores dos elementos fletidos existiu um pequeno esmagamento na direção normal às fibras por conta do pistão de ensaio, enfraquecendo a região de aplicação da carga e contribuindo para a ruptura.

As Figuras 58 e 59 apresentam os modos de rupturas padrões ocorridos nos elementos de MLC produzidos com madeira de Cedro australiano com adesivo poliuretano AG101 (combinações AP) e resorcinol-formaldeído Cascophen (combinações AF), respectivamente.

Figura 58 – Modos de ruptura dos MLC de Cedro australiano com adesivo poliuretano.



(a) AP-P



(b) AP-80



(c) AP-120



(d) AP-220

Fonte: Autoria própria.

Figura 59 – Modos de ruptura dos MLC de Cedro australiano com adesivo resorcinol-formaldeído.



(a) AF-P



(b) AF-80



(c) AF-120



(d) AF-220

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 60 e 61 apresentam os modos de rupturas observados nos elementos de MLC produzidos com madeira de Cedro indiano com adesivo poliuretano AG101 (combinações IP) e resorcinol-formaldeído Cascophen (combinações IF), respectivamente.

Figura 60 – Modos de ruptura dos MLC de Cedro indiano com adesivo poliuretano.



(a) IP-P



(b) IP-80



(c) IP-120



(d) IP-220

Fonte: Autoria própria.

Figura 61 – Modos de ruptura dos MLC de Cedro indiano com adesivo resorcinol-formaldeído.



(a) IF-P



(b) IF-80



(c) IF-120



(d) IF-220

Fonte: Autoria própria.

Analisando as figuras apresentadas acima, pode-se observar que a colagem dos elementos de MLC, para ambas as madeiras e adesivos, foi eficiente e não foram observadas rupturas na

linha de cola, sendo possível avaliar que o processo de adesão entre as lamelas de madeira ocorreu de forma satisfatória. O modo de ruptura dos elementos de MLC foram semelhantes aos encontrados por Jesus (2000) e Gomes (2018) para elementos produzidos com madeira de Teca, Eucalipto e Pinus, e adesivo poliuretano.

6 CONCLUSÃO

O procedimento apresentado no método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022), baseado na norma europeia EN 14080 (2014), mostrou-se eficiente na avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC. Isso pode ser observado pelo grau de delaminação obtido em função dos limites estabelecidos para o tempo de ensaio.

A caracterização das madeiras utilizadas, realizada com referência à compressão paralela às fibras, indicou para o lote de Cedro australiano a classe de resistência D20, e para o lote de Cedro indiano D30, sendo as densidades (ρ_{ap}) de 0,384 g/cm³ e 0,478 g/cm³, respectivamente. Os valores apresentaram diferença estatisticamente significativas e estão condizentes com os encontrados na literatura para essas espécies.

Os índices de retratibilidade apresentaram diferenças significativas entre as espécies de Cedro australiano e Cedro indiano, porém, os coeficientes de anisotropia, 1,88 e 1,83, respectivamente, indicaram as madeiras possuem a mesma probabilidade de apresentarem trincas e rachaduras devido à variação de umidade.

Para os elementos produzidos com Cedro australiano, a diminuição da rugosidade das superfícies obtidas pelo aumento das gramaturas de lixamento (80, 120 e 220) resultou numa diminuição entre 7 e 13% na resistência ao cisalhamento em relação a amostra sem lixamento para as combinações AP, porém sem diferenças estatísticas. Para as combinações AF, o melhor acabamento resultou em aumentos significativos das resistências ao cisalhamento das linhas de cola, variando entre 1,7% e 15% em relação ao sem lixamento.

Para os elementos produzidos com Cedro indiano, as combinações IP apresentaram aumentos significativos na resistência ao cisalhamento das linhas de cola, com aumentos variando entre 19% e 35%. Porém, para as combinações IF, foi observado uma diminuição da resistência entre 4% e 17% ao realizar o lixamento das lamelas.

Para todas as combinações espécie-adesivo-acabamento estudadas, a predominância de ruptura na região de colagem, observadas nos ensaios de cisalhamento das linhas de cola ocorreram com maior porcentagem na madeira, indicando a boa qualidade de colagem dos produtos confeccionados (MLC). A média das porcentagens de ruptura na madeira variou entre 75,80% e 87,80% para as combinações adesivo-acabamento que utilizaram madeiras de Cedro australiano, e entre 75,50% e 86,40% para as combinações que utilizaram madeiras de Cedro indiano.

Apesar de algumas combinações apresentarem diferenças significativas nos valores de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, de forma geral, não ficou claro se as diferentes condições de lixamento influenciaram de forma relevante nos resultados.

A ANOVA considerou como significativa a interação entre os fatores adesivo e acabamento superficial no cisalhamento das linhas de cola dos elementos de MLC produzidos pelas duas espécies de madeira, mas ao analisar os fatores individualmente, apenas o tipo de adesivo também afetou essa propriedade de forma significativa, podendo-se concluir que os diferentes acabamentos realmente não influenciaram nos resultados.

As porcentagens de delaminação total dos elementos de MLC produzidos com as duas espécies de madeira, para todas as combinações de adesivo-acabamento, ficaram abaixo do limite de 6% estabelecido pela NBR 7190-6 (2022) para folhosas.

Para os elementos de MLC produzidos com Cedro australiano e adesivos poliuretano e resorcinol-formaldeído foram observadas baixas porcentagens de delaminação e bem próximas entre si, variando entre 0,22% e 1,93% para as combinações AP, e entre 0,29% e 1,98% para as combinações AF. Para o Cedro indiano, as amostras produzidas com o adesivo resorcinol-formaldeído apresentaram menores porcentagens de delaminação em comparação com o adesivo poliuretano, variando entre 3,29% e 4,15% para as combinações IF, e entre 4,90% e 5,53% para as combinações IP.

Também foi observado que houve relação entre a espessura da linha de cola e a delaminação nos elementos de MLC produzidos com Cedro indiano, para os dois adesivos, mas essa relação não foi observada para os elementos de Cedro australiano.

Em relação ao melhor acabamento das superfícies das lamelas, não é possível afirmar se houve influência na porcentagem de delaminação das linhas de cola, pois os valores obtidos não apresentaram grandes diferenças.

Com os resultados obtidos observou-se que apenas os elementos produzidos com madeiras de Cedro indiano e adesivo poliuretano AG101 apresentaram melhor qualidade de colagem com a diminuição da rugosidade na superfície das lamelas. Nas demais combinações, os lixamentos não melhoraram a qualidade de colagem, ou não apresentaram uma relação direta entre a porcentagem de delaminação e a porcentagem de ruptura na madeira na região adesiva.

A ANOVA não considerou significativa a interação dos fatores adesivo e acabamento superficial para as propriedades de rigidez e resistência à flexão dos elementos de MLC produzidos com ambas as espécies de madeira estudadas.

Ao analisar a influência do acabamento superficial, de forma isolada, observou-se que, apenas os elementos produzidos com Cedro australiano e adesivo resorcinol-formaldeído apresentaram diferenças significativas para os valores de resistência à flexão, mas não foram diferentes para a rigidez. Já as combinações produzidas com adesivo poliuretano não apresentaram diferenças entre seus valores para nenhuma das duas propriedades.

Os melhores resultados foram provenientes do acabamento superficial feito pela plaina desgrossadeira para ambos os adesivos, onde foram obtidos valores de rigidez e resistência à flexão de 7315 MPa e 49,78 MPa para a combinação AP, e de 7955 MPa e 53,43 MPa para a combinação AF, respectivamente. Foram observadas reduções de valores obtidos de 3% a 5% para as combinações AP e de 3% a 9% para as combinações AF ao realizar os lixamentos na superfície das lamelas.

Para os elementos produzidos com Cedro indiano e resorcinol-formaldeído, os valores de rigidez e resistência à flexão apresentaram diferenças significativas entre os diferentes acabamentos, porém com as combinações com adesivo poliuretano isso não ocorreu.

Os melhores resultados também foram com o acabamento feito pela plaina desgrossadeira, nos quais foram obtidos valores de rigidez e resistência à flexão de 7951 MPa e 60,44 MPa para a combinação IP, e de 7959 MPa e 59,18 MPa para a combinação IF. Para os elementos produzidos com Cedro indiano foi observado que o lixamento das lamelas diminuiu a rigidez e resistência à flexão entre 4,5% e 18% nas combinações estudadas.

Ao analisar a influência do tipo de adesivo em cada acabamento, de forma isolada, temos que, os elementos de Cedro australiano com acabamentos realizados pela plaina e lixa 80 apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Para os elementos de Cedro indiano, nenhum acabamento sofreu influência do tipo de adesivo utilizado.

Para ambas as madeiras, o processo de ruptura teve sua origem na região de compressão das vigas (lamela superior), com liberação de tensão que avança para o rompimento das fibras mais tracionadas (lamela inferior).

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Revista Floresta e Ambiente**, Curitiba, PR, v. 7, n. 1, p. 158-166, 2000. Disponível em: <https://floram.org/article/588e21f1e710ab87018b45a9/pdf/floram-7-%C3%BAnico-158.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.

ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Colagem varia de acordo com propriedades da madeira. **Revista Madeira**, Lages, SC, n. 88, 2005. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=700&subject=Adesivos&#:~:text=Colagem%20varia%20de%20acordo%20com,dificuldades%20do%20que%20as%20con%C3%ADferas. Acesso em: 20 out. 2022.

ALLEN, W. K. The mechanical theory of adhesion. In: PACKHAM, D. E. **Handbook of adhesion**. 2. ed. Harlow: Longman Scientific and Technical, 2005. chapter 12, p. 275-289.

ALMEIDA, V. C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo uréia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2009. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/3002>. Acesso em: 20 out. 2022.

ALMEIDA, D. H. *et al.* Evaluation of Quality in the Adhesion of Glued Laminated Timber (Glulam) of Paricá and Lyptus Wood Species. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, CA, v. 4, p. 114-118, 2014. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20140403.07.html>. Acesso em: 20 out. 2022.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC T110**: cyclic delamination test. Portland: AITC, 2007.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC 115**: standard for fabricated structural timber components and assemblies. Portland: AITC, 2009.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC A190.1**: standard for wood products – structural glued laminated timber. Portland: AITC, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2559**: standard specification for adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions. West Conshohocken: ASTM, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D905**: standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. West Conshohocken: ASTM, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4668**: standard test method for evaluating structural adhesives for finger jointing lumber. West Conshohocken: ASTM, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198**: standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken: ASTM, 2015.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1200**: standard test method for viscosity by ford viscosity cup. West Conshohocken: ASTM, 2018.

ARAÚJO, D. R.; MOLINA, J. C. Efeito da umidade da madeira na resistência ao cisalhamento da linha de cola. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, PR, v. 9, p. 79-88, 2017. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11684>. Acesso em: 20 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: projeto de estruturas de madeira – parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-2**: projeto de estruturas de madeira – parte 2: critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3**: projeto de estruturas de madeira – parte 3: métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-4**: projeto de estruturas de madeira – parte 4: métodos de ensaio para madeira lamelada colada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-5**: projeto de estruturas de madeira – parte 5: métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-6**: projeto de estruturas de madeira – parte 6: métodos de ensaio para madeira lamelada colada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-7: estruturas de madeira – parte 7: métodos de ensaio para madeira lamelada colada cruzada estrutural**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

AZAMBUJA, M. A. **Avaliação do adesivo poliuretano a base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.88.2017.tde-11072017-151910>. Acesso em: 24 jan. 2022.

AZAMBUJA, M.A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira lamelada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.88.2006.tde-22112010-145050>. Acesso em: 24 jan. 2022.

AZAMBUJA, M. A.; DIAS, A. A. Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC). **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, SP, v. 3, n. 8, 2002. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/416>. Acesso em: 24 jan. 2022.

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/21519/TESE%20EA%20.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2022.

BARROS, L. S. **Comparação da rigidez de elementos de MLC a partir de ensaios de flexão estática e técnica de excitação por Impulso**. 2019. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Instituto de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2019.

BATISTA, A. *et al.* Tensile strength evaluation on structural timber finger joints, **Maderas Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, Región del Bío-Bío, v. 4, n. 2, p. 168-178, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/297371556_Tensile_strength_evaluati_on_on_structural_timber_finger_joints. Acesso em: 24 jan. 2022.

BERTOLINI, M. S. *et al.* Accelerated artificial aging of particleboards from residues of CCB treated Pinus sp. and castor oil resin. **Materials Research**, São Carlos, SP, v. 16, p. 293-303, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000003>. Acesso em: 18 mar. 2021.

BERTOLINI, M. S. *et al.* Painéis de partículas provenientes de rejeitos de *Pinus* sp. tratado com preservante CCA e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 339–346, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200014>. Acesso em: 24 mar. 2021.

BIANCHI, N. A. **Avaliação da delaminação e da resistência da linha de cola de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013 considerando madeiras de reflorestamento tratadas com CCA e sem tratamento preservativo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/402c7120-1d1e-4f6b-a665-e0be2afc2787/content>. Acesso em: 24 mar. 2021.

BLOMQUIST, R. F. *et al.* **Adhesive bonding of wood and other structural materials - Volume III**, 1. ed. Madison: Clark C. Heritage Memorial Series on Wood, 1983.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. 1. ed. New York: Krieger Pub Co, 1993.

BUDYNAS, R. G.; NISBTT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2016.

BURATTA, C. C. **Adesão de peças de madeira de reflorestamento coladas com adesivo estrutural**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019. Disponível em: <https://tede.ufrj.br/jspui/bitstream/jspui/5073/2/2019%20-%20Caterina%20Carvalho%20Buratta.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2020.

BURDURLU, E. *et al.* The effect on shear strength of different surfacing techniques in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lysky) and Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) bonded joints. **Journal Adhesion Science Technology**, London, v. 21, n. 3/4, p. 319-330, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/156856107780684611>. Acesso em: 26 fev. 2020.

BYGRAVE, F. L.; BYGRAVE, P. L. **Growing Australian red cedar**. 1. ed. Canberra: Rural Industries Research and Development Corporation, 2005.

CALIL JUNIOR, C. *et al.* **Estruturas de Madeira: Projetos, dimensionamento e exemplos de cálculo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2019.

CALIL MADEIRAS. **Aplicações: Residenciais, pergolados, abrigos externos, espaços urbanos, pontes e passarelas, templos religiosos, adegas e destilarias**. São Carlos: Calil Madeiras, [2022] Disponível em: [http://madeiralaminadacolada.com/aplicacoes.php#!prettyPhoto\[gallery\]](http://madeiralaminadacolada.com/aplicacoes.php#!prettyPhoto[gallery]). Acesso em: 02 fev. 2022.

CALIL NETO, C. *et al.* Analysis of specie-treatment-adhesive combinations for Glulam purpose. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, CA, v. 4, n. 1, p. 41-47, 2014a. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20140401.06.html>. Acesso em: 28 mai. 2020.

CALIL NETO, C. *et al.* Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 24, n. 4, p. 989-996, 2014b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-509820142404018>. Acesso em: 28 mai. 2020.

CALIL NETO, C. *et al.* Specie - treatment - adhesive combinations for glulam purpose. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, RS, v. 3, p. 16-23, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v3n2p16-23>. Acesso em: 28 mai. 2020.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 112.9**: evaluation of adhesives for structural wood products (exterior exposure). Mississauga: CSA, 2004.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 177**: qualification code for manufactures of structural glued-laminated timber. Mississauga: CSA, 2006.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 112.10**: evaluation of adhesives for structural wood products (limited moisture exposure). Mississauga: CSA, 2007.

CANGEMI, J. M. **Biodegradação de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2006. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.75.2006.tde-26042007-091940>. Acesso em: 19 mai. 2022.

CANGEMI, J. M. *et al.* Biodegradation of Polyurethane Derived from Castor Oil. **Polímeros**, São Carlos, SP, v. 18, p. 201-206, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000300004>. Acesso em: 19 mai. 2022.

CARNEIRO, R. P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/5086>. Acesso em: 19 mai. 2022.

CARVALHO, P. E. R. Espécies introduzidas alternativas às do gênero Pinus e Eucalyptus para reflorestamento no Centro-Sul do Brasil. In: GALVÃO, A. P. M. **Espécies não tradicionais para plantios com finalidades produtivas e ambientais**. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 1998. p. 75-99.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras – Volume 1**. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1044 p.

CASTRO, E. M. **Estudo da usinabilidade de chapas de MDF para usinagem de desbaste e acabamento**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.88.2016.tde-16092016-110705>. Acesso em: 29 jun. 2021.

CAVALHEIRO, R. S. **Aplicação de diferentes técnicas de microscopia para análises da região adesiva em madeira lamelada colada (MLC)**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2018.tde-26092018-102603>. Acesso em: 29 jun. 2021.

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**, London, v. 155, p. 560-570, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11250/2462723>. Acesso em: 29 jun. 2021.

CHAHUD, E.; LAHR, F. A. R.; PERES, R. R. R. O uso de espécies nativas comercializadas em belo horizonte na composição de madeira laminada colada. **Construindo**, Belo Horizonte, MG, v. 1, n. 2, p. 46-49, 2009. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/1739>. Acesso em: 29 jun. 2021.

CHAHUD, E. *et al.* Shear strength of joints in glued laminated timber: Normative verification of bibliography results. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, CA, v. 8, n. 6, p. 152-157, 2018. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20180806.03.html>. Acesso em: 29 jun. 2021.

CRUZ, H.; CUSTÓDIO, J. Adhesives for on-site rehabilitation of timber structures. **Journal Of Adhesion Science and Technology**, London, v. 24, n. 8-10, p. 1473-1499, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/016942410X501089>. Acesso em: 29 jun. 2021.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. **Cerne**, Lavras, MG, v. 17, n. 4, p. 593-600, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400019>. Acesso em: 29 jun. 2021.

CUSTÓDIO, J.; BROUGHTONB, J.; CRUZ, H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 29, p. 173-185, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.03.002>. Acesso em: 27 jun. 2021.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, SP, v. 3, n. 8, 2002. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/407>. Acesso em: 27 jun. 2021.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira**. 2005. Dissertação (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-31082009-105836/>. Acesso em: 17 set. 2022.

DRESSLER, V. L. **Investigação de métodos e procedimentos para determinação de tanino e cromo em efluente de curtume**. 1994. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1994.

DUNKY, M. Adhesives in the Wood Industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesives Technology**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. chapter 20, p. 511-574.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 386**: glued laminated timber: performance requirements and minimum production requirements. Brussels: EN, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 789**: timber structures: test methods - determination of mechanical properties of wood-based panels. Brussels: EN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 408**: timber structures: structural timber and glued laminated timber - determination of some physical and mechanical properties. Brussels: EN, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14080**: timber structures: glued laminated timber and glued solid timber - requirements. Brussels: EN, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 16351**: timber structures: cross laminated timber - requirements. Brussels: EN, 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 301**: adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - classification and performance requirements. Brussels: EN, 2018.

FARIA, D. L. *et al.* Number of laminae on the mechanical behavior of glued laminated timber (glulam) of *Toona ciliata* produced with vegetable polyurethane adhesive. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 43, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943014819>. Acesso em: 28 set. 2022.

FERDOSIAN, F. *et al.* Bio-Based Adhesives and Evaluation for Wood Composite Application. **Polymer**, Texas, v. 9, p. 70, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym9020070>. Acesso em: 28 set. 2022.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; AZAMBUJA, M. A. Proposta de normalização para madeira laminada colada (MLC). **Revista Madeira**, São Carlos, SP, v. 13, p. 01-10, 2004. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/278>. Acesso em: 01 jan. 2020.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.88.2005.tde-19072005-110613>. Acesso em: 01 jan. 2020.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**, Switzerland, v. 44, p. 1431-1440, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-011-9708-y>. Acesso em: 01 jan. 2020.

FIRMINO, A. C.; MORAES, W. B.; FURTADO, E. L. Primeiro relato de *Ceratocystis fimbriata* causando seca em *Acrocarpus fraxinifolius* no Brasil. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, SP, v. 41, n. 2, p. 160-160, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-5405/1954>. Acesso em: 01 jan. 2020.

FRIHART, C. R. Adhesive interaction with wood. In: ROWELL, R. M. **Fundamentals of composite processing**. 1. ed. Madison: U.S. Department of Agriculture, 2004. p. 29-38.

FRIHART, C. R. Wood adhesion and adhesives. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 1. ed. Madison: U.S. Department of Agriculture, 2005. p. 215-278.

FRIHART, C. R., HUNT, C. G. Adhesives with Wood Materials - Bond Formation and Performance. In: **Wood Handbook - Wood as an Engineering Material**, Madison: U.S. Department of Agriculture, 2010. chapter 10, p. 101-124.

FRIHART, C. R. Wood adhesives: Vital for producing most wood products. **Forest Products Journal**, LaGrange, GA, v. 61, p. 4-12, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.1.4>. Acesso em: 22 fev. 2022.

FOR NATURE WOODS. **Construção, carpintaria e marcenaria**. Sorocaba: For Nature Woods Marcenaria [2022]. Disponível em: <https://www.fornaturemarcenariaearte.com/vigas-de-eucalipto/prod-8897310/>. Acesso em: 24 jun. 2022.

GARBE, E. A. *et al.* Analysis of deflated prices and its trend of Glulam and its main raw materials by the quantitative time series method. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, SP, v. 31, n. 2, p. 131-145, 2019. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/inflorestal/sites/234/2020/05/revista-if-31-2_completa.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.

GARCIA, C. H.; MORA, A. L. **A cultura de Eucalipto no Brasil**. 1. ed. São Paulo: SBS, 2000. 112 p. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3519>. Acesso em: 24 jun. 2020.

GIBBS, N. **Guia essencial da madeira**: um manual ilustrado de 100 madeiras decorativas e suas aplicações. 1. ed. Lisboa: LISMA, 2005. 254 p.

GRANDMONT, J. F. *et al.* **Canadian CLT Handbook**. 1. ed. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019. 812 p.

GOMES, N. B. **Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/153503>. Acesso em: 24 jun. 2020.

HONORATO, S. J. A. *et al.* Cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*) una opción agroflorestal para la sierra Norte del estado de Puebla. **Folheto Técnico**. Ciudad de México: INIFAP, v. 1, p. 41, 2005.

HSE, C.; KUO, M. Influence of extractives on wood gluing and finishing – a review. **Forest Products Journal**, LaGrange, GA, v. 38, p. 52-56, 1988. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/8068>. Acesso em: 24 jun. 2020.

ICIMOTO, F. H. **Dormentes em Madeira Laminada Colada de *Pinus oocarpa***. 2013. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2013.tde-23012014-110222>. Acesso em: 24 jun. 2020.

ICIMOTO, F. H. *et al.* Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beams of *Pinus oocarpa*. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, CA, v. 6, n. 2, p. 51-55, 2016. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20160602.05.html>. Acesso em: 24 jun. 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório IBÁ 2022**. Brasília: FGV Ibre, 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 13 mai. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Informações sobre madeiras**. São Paulo. 1989. Disponível em: https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca. Acesso em: 02 jan. 2021.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 6891**: timber structures – joints made with mechanical fasteners – general principles for the determination of strength and deformation characteristics. Switzerland: ISO, 1983.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 4287**: rugosidade: método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade. Genebra: ISO, 2002.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 13910**: timber structures – strength graded timber – test methods for structural properties. Genebra: ISO, 2014.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. 1. ed. Curitiba: FUPEF, 2005.

JANKOWSKY, I. P. **Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira**. 1979. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1979.

JENNINGS, J. D. **Investigating the surface energy and bond performance of compression densified wood**. 2003. Dissertation (Master in Wood Science) – Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State, Blacksburg, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10919/10150>. Acesso em: 23 jul. 2022.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.88.2016.tde-16092016-161024>. Acesso em: 23 jul. 2022.

KEHL. **Aglomerantes**. São Carlos: Kehl Ind e Com Ltda, 2011. 5 p. Disponível em: https://www.kehl.ind.br/catalogos/KEHL_-_Aglomerante_1.pdf. Acesso em: 08 nov. 2021.

KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, London, v. 41, n. 8, p. 1074-1078, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132305001691>. Acesso em: 10 nov. 2021.

KNORZ, M. *et al.* Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural handwood-adhesive bonds. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 57, p. 40-48, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.10.003>. Acesso em: 10 nov. 2021.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas. 1. ed. Eschborn: GTZ, 1990. 338 p.

LAVABRE, M. **Aromaterapia**: a cura pelos óleos essenciais. 5 ed. Rio de Janeiro: Editora Nova Era, 2001. 370 p.

LINTZ, R. C. C. *et al.* Study of the reuse of construction residues in concrete employed by blocks manufacture. **Ibracon Structures and Materials Journal**, São Paulo, SP, v. 5, n. 2, p. 166-181, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/dQWNJzXhYBZQJpMjnzCP3Yq>. Acesso em: 10 nov. 2021.

LÓPEZ-SUEVOS F.; RICHTER, K. Hydroxymethylated resorcinol (HMR) and novolak-based HMR (n-HMR) primers to enhance bond durability of Eucalyptus globulus glulams. **Journal of Adhesion Science and Technology**, London, v. 23, p. 1925-1937, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/016942409X12508517390914>. Acesso em: 10 nov. 2021.

LORENZI, H. *et al.* **Árvores exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas**. 1. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003.

LUZ, A. B. *et al.* Application of collated laminated wood (MLC) as beams of bridges: an analysis under the view of the NBR 7190/1997 review project. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, PR, v. 6, n. 8, p. 59283-59306, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/15170/12520>. Acesso em: 10 nov. 2021.

MAGHEMBE, J. A.; PRINS, H. Performance of multipurpose trees for agroforestry two years after planting at Makoka, Malawi. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 64, n. 2/3, p. 171-182, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)90291-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)90291-7). Acesso em: 10 nov. 2021.

MARRA, A. A., **Technology of wood bonding: principles in practice**. 1. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 454 p.

MARTÍNEZ, P. E. *et al.* Cultivo intercalado de cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight) y su efecto sobre el contenido de materia orgánica en el suelo. **Revista Científica UDO Agrícola**, Cumaná, v. 6, n. 1, p. 109- 113, 2006. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2252810>. Acesso em: 10 nov. 2021.

MASCIA, N. T. Analysis of stresses and displacements in cylindrical wood parts due to shrinkage. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, RJ, v. 20, n. 1, p. 1-14, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190169>. Acesso em: 10 nov. 2022.

MELOTTO, M. A. **Estudo do tempo de adesão, da temperatura e da pressão de colagem na tensão limite de cisalhamento de uniões de madeira de *Eucalyptus grandis* coladas com adesivo sem solvente**. 2007. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.11.2007.tde-14052007-164357>. Acesso em: 10 nov. 2021.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2009.tde-15062009-094616>. Acesso em: 10 nov. 2021.

MISHRA, G. *et al.* Global Scenario of *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn.: a future tree of agro forestry. **International Letters of Natural Sciences**, Switzerland, v. 3, p. 25-29, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.56431/p-8tqvyyh>. Acesso em: 10 nov. 2021.

MOLINA, J. C. **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2008.tde-04082008-111830>. Acesso em: 10 nov. 2021.

MOMENTIVE. **Boletim técnico Cascophen RS-216-M**. Cotia, 2011.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; ALVES, R. C. Influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de Eucalipto. **Construindo**, Belo Horizonte, MG, v. 4, n. 2, p. 96-103, 2012. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/1688>. Acesso em: 10 nov. 2021.

MURAKAMI, C. H. G. Cedro Australiano: valorização de espécies nobres. **Boletim Florestal**, São Paulo, SP, v. 7, n. 2, p. 1-6, 2008.

NASCIMENTO, A. M. *et al.* Comportamento de ligações adesivas em madeira de reflorestamento. **Revista Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, RJ, v. 9, n. 1, p. 54-62, 2002. Disponível em: <https://floram.org/article/588e21fde710ab87018b45db>. Acesso em: 10 nov. 2021.

NASCIMENTO, M. F. *et al.* Painéis OSB fabricados com madeiras da caatinga do nordeste do Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, RS, v. 15, n. 1, p. 41-48, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212015000100005>. Acesso em: 10 nov. 2021.

NASSUR, O. A. C. *et al.* Variações na qualidade de toras de *Toona ciliata* M. Roem com dezoito anos de idade. **Cerne**, Lavras, MG, v. 19, n. 1, p. 43-49, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000100006>. Acesso em: 10 nov. 2021.

NIE, X. **Failure mechanism of rolling shear failure in cross-laminated timber**. 2015. Dissertation (Master of Forestal Science) – The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies, University of British Columbia, Vancouver, 2015. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.14288/1.0215881>. Acesso em: 10 nov. 2021.

NISGOSKI, S. *et al.* Anatomia da madeira de *Toona ciliata* características das fibras para produção de papel. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 4, p. 717-728, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v41i4.25337>. Acesso em: 05 mai. 2020.

NOGUEIRA, R. S. **Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2017.tde-22062017-102209>. Acesso em: 05 mai. 2020.

OHNESORGE, D; RICHTER, K.; BECKER, G. Influence of wood properties and bonding parameters on bonder durability of European Beech (*Fagus sylvatica* - L). **Annals of Forest Science**, London, v. 67, n. 6-8, 2010. Disponível em: <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1051/forest/2010002>. Acesso em: 05 mai. 2020.

OLIVEIRA, R. G. E. *et al.* Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* glulam. **Maderas Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, Región del Bío-Bío, v. 22, n. 4, p. 495-504, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000408>. Acesso em: 05 mai. 2021.

OLIVEIRA, K. A.; OLIVEIRA, C. A. B.; MOLINA, J. C. Physical, chemical and mechanical characterization of *Acrocarpus fraxinifolius* cultivated in Sao Paulo. **Maderas Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, Región del Bío-Bío, v. 24, n. 9, p. 1-8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100409>. Acesso em: 10 set. 2022.

PACKHAM, D. E. Roughness, and adhesion. In: PACKHAM, D. E. **Handbook of adhesion**. 2. ed. Harlow: Longman Scientific and Technical, 2005. chapter 7, p. 215-219.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 1. ed. New York: McCraw-Hill, 1980. 736 p.

PARIS, J. L.; KAMKE, F. A. Quantitative Wood-adhesive penetration with Xray computed tomography. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, London, v. 61, p. 61- 80, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.05.006>. Acesso em: 10 set. 2022.

PASCHOA, D. P. **Avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC confeccionados com madeiras de eucalipto e resina fenólica**. 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Instituto de Ciência e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/203726>. Acesso em: 10 set. 2021.

PEREYRA, O. *et al.* Estudio de las propiedades físico-mecánicas y comportamiento em procesos industriales de la madera de Kiri, Gravillea, Paraíso y Toona. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 213-223, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v36i2.6457>. Acesso em: 10 set. 2021.

PETRIE, E. M. **Handbook of adhesives and sealants**. 1. ed. Toronto: McGraw-Hill Professional, 2000. 896 p.

PINHEIRO, A. L.; RAMALHO, R. S.; BARREIROS, H. S. Árvores exóticas em Viçosa: II *Toona ciliata* M. Roem. var. *australis* (F.v.M.) C.DC. (*Meliaceae*). **Ceres**, Viçosa, MG, v. 41, n. 234, p. 103-112, 1994. Disponível em: <https://ojs.ceres.ufv.br/index.php/ceres/article/view/2062/109>. Acesso em: 10 set. 2021.

PINHEIRO, A. L.; LANI, J. L.; COUTO, L. **Cedro australiano: cultivo e utilização** (*Toona ciliata* M. Roem. var. *australis* (F. Muell) Bahadur). 1. ed. Viçosa: UFV, 2003. 42 p.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. 1. ed. New York: CRC Press, 1994. 304 p.

PLASTER, O. *et al.* Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, MG, v. 14, n. 3, p. 251-258, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/14026>. Acesso em: 13 out. 2020.

PRADO, C. A. *et al.* Características físicas e químicas da madeira de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Colombo: Embrapa Florestas, v. 14, 2003.

PROPERZI, M.; PIZZI, A.; UZIELLI, L. Comparative wet wood glueing performance of different types of Glulam wood adhesives. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 61, p. 77-78, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0347-4>. Acesso em: 13 out. 2020.

RAKNES, E. Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing. **European Journal of Wood and Wood Products**, London, v. 55, n. 2-4, p. 83-90, 1997. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02990523>. Acesso em: 13 out. 2020.

REIS, A. H. S. *et al.* Physical-mechanical properties of plywood produced with *Acrocarpus fraxinifolius* and *Pinus oocarpa*. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, RJ, v. 26, n. 4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.015717>. Acesso em: 13 out. 2020.

ROCCO LAHR, F. A. *et al.* influence of storage period of pieces in stiffness of *Pinus elliottii* glulam beams. **Advanced Materials Research (Online)**, Abingdon, OX, v. 1025-1026, p. 64-67, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.64>. Acesso em: 13 out. 2020.

ROCCO LAHR, F. A. *et al.* Evaluation of the Moisture Content in Stiffness Properties of Structural Glulam Beams. **Advanced Materials Research (Online)**, Abingdon, OX, v. 1088, p. 676-679, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1088.676>. Acesso em: 14 nov. 2021.

ROSA, T. O. *et al.* Classificação visual e mecânica da espécie *Cryptomeria japonica* D. Don para utilização em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 30, n. 2, p. 451-462, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509837084>. Acesso em: 14 nov. 2021.

SANTOS, L. D. T. *et al.* Crescimento e morfoanatomia foliar de eucalipto sob efeito de deriva do glyphosate. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 133-142, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582005000100016>. Acesso em: 14 nov. 2021.

SANTOS, F. F. *et al.* Adequação dos municípios do estado do Rio Grande do Sul à legislação de gestão de resíduos da construção civil. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, Florianópolis, SC, v. 4, p. 1-18, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/314833272_Adequacao_dos_Municipios_do_Estado_do_Rio_Grande_do_Sul_a_Legislacao_de_Gestao_de_Residuos_da_Construcao_Civil. Acesso em: 14 nov. 2020.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and Mechanisms of Adhesion. In: PIZZI A.; MITTAL, K. L **Handbook of Adhesive Technology**: revised and expanded. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 61-75.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Avaliação de vigas de madeira laminada colada de Cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, Lavras, MG, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000300011>. Acesso em: 14 nov. 2020.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Resistência de linhas de cola para madeiras de reflorestamento. **Semina. Ciências Exatas e Tecnológicas (Online)**, Londrina, PR, v. 36, p. 107-116, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2015v36n1p107>. Acesso em: 14 nov. 2020.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 43, n. 107, p. 533-540, 2015. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/16345>. Acesso em: 14 nov. 2020.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, RJ, v. 22, n. 2, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0140>. Acesso em: 14 nov. 2020.

SERRANO, L. J. P. **Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden e seus impactos na mecânica de vigas laminadas coladas.** 2013.

Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.2013.tde-23082013-160759>. Acesso em: 14 nov. 2020.

SHUPE, T. F.; HSE, C. Y.; WANG, W. H. An investigation of selected factors that influence hardwood wettability. **Holzforschung – International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**, Berlin, v. 55, n. 5-6, p. 541-548, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/HF.2001.087>. Acesso em: 10 abr. 2020.

SILVA, M. R. *et al.* Permeability measurements of Brazilian *Eucalyptus*. **Materials Research**, São Paulo, SP, v. 13, n. 3-4, p. 281-286, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000300002>. Acesso em: 10 abr. 2020.

SILVA, S. A. M.; AZAMBUJA, M. A.; SEGANTINI, A. A. S. Avaliação da densidade aparente de chapas de madeira aglomerada confeccionadas com partículas de madeira tropical e poliuretano derivado de óleo de mamona. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos: EESC/USP, 2013. p. 91-110.

SILVEIRA, R. L. V. A. Evaluation of the nutritional status of Eucalypts: visual and foliar diagnosis and their interpretation. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 85-111.

SIMPSON, W. T. **Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings: tropical and temperate hardwoods**. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1996. 59 p.

SKEIST, I. **Handbook of adhesives**. 1. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 779 p.

SOAREZ, T. S.; CARVALHO, R. M. M. A.; VALE A. B. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 689-694, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000500011>. Acesso em: 10 abr. 2020.

SOUZA, C. R. *et al.* Behaviour of *Acacia mangium* and clones of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* in experimental plantations in Central Amazônia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, n. 65, p. 95-101, 2004. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr65/cap09.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2020.

STROBECH, C. Polyurethane adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, n. 3, v. 10, p. 225-228, 1990.

SUIREZS, T. *et al.* Natural durability and apparent specific weights of *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn (Pink Cedar) cultivated in the Province of Misiones, Argentina., **Procedia**

Materials Science, London, v. 8, p. 802-806, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.138>. Acesso em: 10 abr. 2020.

TELLO, J. **Physic-mechanical characterization of *Acrocarpus fraxinifolius* wood**. 2009. Thesis (PhD) – College of Wood Technology Engineer, University Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Mexico, 2009.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Analysis of glued laminated beams performance of Parica species (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 38, n. 87, p. 471-480, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/297486339_Analysis_of_glued_laminated_beams_performance_of_parica_species_Schizolobium_Amazonicum_Huber_ex_Ducke. Acesso em: 10 abr. 2020.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas de rápido crescimento para produção de painéis de madeira aglomerada**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/24136>. Acesso em: 10 abr. 2020.

TRIANOSKI, R. *et al.* Viabilidade da utilização de *Acrocarpus fraxinifolius* em diferentes proporções com *Pinus* spp. para produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 39, n. 91, p. 343 350, 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/16381>. Acesso em: 10 abr. 2020.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S. Propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira de Cedro australiano cultivado em Corupá, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 34, n. 80, p. 435-441, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.523>. Acesso em: 06 mai. 2021.

TURESSON, J. *et al.* Shear modulus analysis of cross-laminated timber using picture frame tests and finite element simulations. **Materials And Structures**, London, v. 53, n. 4, p. 1-9, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-020-01545-1>. Acesso em: 06 mai. 2021.

VALVERDE, S. Plantações de Eucalipto no Brasil. **Revista da Madeira**, São Carlos, SP, v. 1, n. 107, 2007. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1132&subject=Eucalipto&title=Planta. Acesso em: 06 mai. 2021.

VENTURIN, N.; CARLOS, L.; MACEDO, R. L. G. Desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades. **Cerne**, Lavras, MG, v. 20, n. 4, p. 629-636, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104776020142004668>. Acesso em: 06 mai. 2021.

VICK, C. B. **Wood handbook: wood as an engineering material**. 1. ed. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1999. Disponível em: https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf. Acesso em: 06 mai. 2021.

VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de cross laminated timber submetidas à flexão**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2020.1127189>. Acesso em: 06 mai. 2021.

VILGUTS, A.; SERDJUKS, D.; PAKRASTINS, L. Design methods of elements from cross-laminated timber subjected to flexure. **Procedia Engineering**, Netherlands, v. 117, p. 10–19, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.117>. Acesso em: 10 abr. 2021.

WANG, H. *et al.* Walnut Meal as Formaldehyde-free Adhesive for Plywood Panels. **Bioresources**, Raleigh, NC, v. 13, n. 2, p. 4301-4309, 2018. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/walnut-meal-as-formaldehyde-free-adhesive-for-plywood-panels/>. Acesso em: 10 abr. 2021.

WREGE, M. S. *et al.* Pinus tropical com potencial para uso em plantios comerciais no Brasil. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, SP, v. 26, n. 2, p. 137-145, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/rif.2014.010>. Acesso em: 20 jun. 2022.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2003.tde-26052006-150001>. Acesso em: 20 jun. 2022.

ZANGIÁCOMO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, SP, v. 9, n. 40, p. 103-131, 2007. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/396>. Acesso em: 20 jun. 2022.

ZENID, G. J. *et al.* Madeira: uso sustentável na construção civil. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas**, São Paulo, SP, 2009. Disponível em: http://aleph.ipt.br/exlibris/aleph/a22_1/apache_media/EEDNCG3N9H98CFVF4C96C1MGVPVJBA.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

ZIECH, R. Q. S. **Cracterísticas tecnológicas da madeira de Cedro australiano (*toona ciliata* m. Roem)**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/4226>. Acesso em: 20 jun. 2022.