

NÁDIA BARROS GOMES

**Análise dos parâmetros de fabricação de elementos de madeira lamelada colada na
resposta da qualidade de colagem com base na ABNT NBR 7190-6:2022**

Nádia Barros Gomes

**Análise dos parâmetros de fabricação de elementos de madeira lamelada colada na
resposta da qualidade de colagem com base na ABNT NBR 7190-6:2022**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia e
Ciências do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para fim de
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Mecânica na Área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina
Coorientador: Dr. Alexandre Jorge Duarte de
Souza

Guaratinguetá - SP
2023

G633a	Gomes, Nádia Barros Análise dos parâmetros de fabricação de elementos de madeira lamelada colada na resposta da qualidade de colagem com base na ABNT NBR 7190-6:2022 / Nádia Barros Gomes - Guaratinguetá, 2023. 94 f : il. Bibliografia: f. 90-94 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza 1. Lâminas de madeira. 2. Resistência ao cisalhamento. 3. Vigas de madeira. 4. Colagem. I. Título. CDU 674(043)
-------	---

REGISTRO DE IMPACTO ESPERADO NA SOCIEDADE

O presente trabalho apresenta resultados relacionados às recomendações da norma ABNT NBR 7190-2022, uma atualização normativa sem testes até o momento. Os resultados contribuem para sua implementação, fornecendo uma fonte de dados potencialmente benéfica à indústria e comunidade acadêmica sobre a colagem de madeira.

REGISTRATION OF EXPECTED IMPACT ON SOCIETY

The present study presents results related to the recommendations of the ABNT NBR 7190-2022, a normative update without tests conducted so far. The findings contribute to its implementation, providing a potentially valuable source of data for both the industry and the academic community regarding wood bonding.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

NÁDIA BARROS GOMES

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


Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente
JULIO CESAR MOLINA
Data: 25/08/2023 14:22:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA

Orientador – USP – São Carlos

participou por videoconferência



Documento assinado digitalmente
ANDRE LUIS CHRISTOFORO
Data: 28/08/2023 08:56:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO

UFSCar

participou por videoconferência



Documento assinado digitalmente
PEDRO GUTEMBERG DE ALCANTARA SEGUNDIN
Data: 28/08/2023 10:28:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. PEDRO GUTEMBERG ALCÂNTARA SEGUNDINHO

UFES

participou por videoconferência



Documento assinado digitalmente
CRISTIANE INACIO DE CAMPOS
Data: 26/08/2023 09:39:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^a. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS

UNESP

participou por videoconferência



Documento assinado digitalmente
MARILIA DA SILVA BERTOLINI
Data: 28/08/2023 10:50:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^a. MARILIA DA SILVA BERTOLINI

UNESP

participou por videoconferência

AGOSTO de 2023

DADOS CURRICULARES

NÁDIA BARROS GOMES

NASCIMENTO	03.10.1992 – Itaberá / SP
FILIAÇÃO	Claudinei Pereira Gomes Sílvia Cristina de Barros
2008/2009	Curso de Nível Médio Técnico em Edificações - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza - ETEC Dr. Demétrio Azevedo Junior
2011/2015	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira – UNESP/Itapeva.
2016/2018	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP
2019/2023	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

Dedico este trabalho primeiramente à Deus.

Dedico também à minha avó Célia e à minha família.

AGRADECIMENTO

Agradeço, em primeiro lugar, à Deus. Aquele que me permitiu chegar até aqui, aquele que esteve comigo desde o início e em todas as etapas da minha vida.

A minha família, por todo apoio e amor oferecidos durante todos esses anos de estudo.

Ao professor Julio Molina, pela orientação, incentivo e ensinamentos dados no decorrer de toda a pesquisa.

Aos técnicos e funcionários da Unesp de Itapeva e de Guaratinguetá.

Aos professores doutores André Luís Christoforo, Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, Cristiane Inácio de Campos e Marília da Silva Bertolini por aceitarem o convite para participar da defesa desta tese.

A todos os meus amigos que de alguma forma colaboraram e me incentivaram nesta trajetória acadêmica.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa consistiu na avaliação dos parâmetros de fabricação na resposta da qualidade de colagem de elementos de MLC com base na ABNT NBR 7190-6:2022. Foram realizadas três etapas de pesquisa sendo utilizadas madeiras de *Eucalypto grandis* e *Pinus elliottii* e diferentes adesivos na produção de MLC. Na primeira etapa foram testadas diferentes pressões de colagem (0,4 MPa, 0,7MPa, 1,2 MPa e 1,5 MPa) na resposta da porcentagem de delaminação e da resistência ao cisalhamento das linhas de cola com adesivo Cascophen RS-216-M. Em seguida, foram também quantificados os modos de ruptura na região de colagem, a partir de dois *softwares* que consideram a análise de imagens: *GLT Rupture Analysis* (desenvolvido pelos pesquisadores da UNESP/Itapeva) e ImageJ. A segunda etapa baseou-se no teste de diferentes proporções de adesivo natural a base de Oxido de Magnésio e Proteína de Soja na resposta da porcentagem de delaminação e resistência ao cisalhamento das linhas de cola. Na terceira etapa avaliou-se a influência de diferentes espessuras de lamela (1,5cm, 2,5cm e 3,5cm) na resposta da resistência ao cisalhamento das linhas de cola com adesivo poliuretano bicomponente. Os resultados obtidos mostraram que as pressões de colagem de 0,7MPa para *Pinus elliottii* e de 1,2MPa para *Eucalypto grandis* confirmaram as recomendações apontadas no texto da ABNT NBR 7190-6:2022 para as combinações espécie/adesivo testadas. Para a madeira de *Pinus elliottii*, houve diferença significativa entre a resistência ao cisalhamento na linha de cola entre lamelas externas e internas. O *software GLT Rupture Analysis* apresentou bons resultados na quantificação da porcentagem de ruptura na madeira, nas regiões de colagem, para a resina Cascophen, quando comparado com os resultados de imagens obtidos pelo software ImageJ. Os ensaios realizados com o adesivo natural mostraram bons resultados de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, mas não apresentaram resultados satisfatórios para a porcentagem de delaminação. Os resultados obtidos para diferentes espessuras mostraram que a espessura de 3,5 cm apresentou melhor qualidade de colagem quando comparado com as demais espessuras. Destaca-se entre as conclusões obtidas que as recomendações de pressão e ensaio de delaminação presentes no método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022 demonstrou eficácia no controle da qualidade da colagem dos elementos de MLC.

PALAVRAS-CHAVE: madeira lamelada colada; qualidade de colagem; cisalhamento na linha de cola; delaminação; pressão de colagem.

ABSTRACT

The objective of this research consisted of evaluating the manufacturing parameters in the response of the bonding quality of Glulam elements based on ABNT NBR 7190-6:2022. Initially, a bibliographic survey was carried out to evaluate the existing standardization on the subject. Subsequently, three stages of research were carried out using *Eucalyptus grandis* and *Pinus elliottii* woods and different adhesives in the manufacture of Glulam elements. In the first stage, different bonding pressures (0.4 MPa, 0.7 MPa, 1.2 MPa and 1.5 MPa) were tested in response to the percentage of delamination and shear strength of the glue lines with Cascophen RS-216-M bicomponent adhesive. After the shear tests of the glue lines, the rupture mode in the gluing region were also quantified, using two software that consider image analysis: GLT Rupture Analysis (developed by the researchers from UNESP/Itapeva) and ImageJ. The second stage was based on testing different proportions of natural adhesive based on Magnesium Oxide and Soy Protein in response to the percentage of delamination and shear strength of the glue lines. In the third stage, specimens with different coverslip thicknesses (1.5cm, 2.5cm and 3.5cm) were tested in response to the shear strength of the glue lines. The results obtained showed that the bonding pressures of 0.7MPa for *Pinus elliottii* and 1.2MPa for *Eucalyptus grandis* confirmed the recommendations indicated in the text of ABNT NBR 7190-6:2022 for the species/adhesive combinations tested. For *Pinus elliottii* wood, a significant difference in shear strength was observed between the glue lines of external and internal lamellae. The GLT Rupture Analysis software presented good results in the quantification of the percentage of rupture in the wood, in the gluing bonding regions, when Cascophen resin was used. The tests performed with the natural adhesive showed good results of shear strength of the glue lines but did not present satisfactory results for the percentage of delamination. The results obtained for different thicknesses showed that the 3.5 cm thickness exhibited better bonding quality when compared to the other thicknesses. Among the conclusions obtained, it is highlighted that the pressure and delamination test recommendations specified in the ABNT NBR 7190-6:2022 test method have proven effective in ensuring the quality of glue bonding in glulam elements.

KEYWORDS: glued laminated timber; collage quality; shear in the glue line; delamination. gluing pressure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Posicionamento das lamelas para a produção de MLC	22
Figura 2 – Estrutura em MLC – Portaria Cerejeiras.....	23
Figura 3 - Avaliação das tensões na viga de MLC - Tensões de von Mises em kgf/cm ²	25
Figura 4 - Emendas de topo denteadas	26
Figura 5 - Aplainamento das lamelas.	26
Figura 6 - Direções ortogonais da madeira vistas macroscopicamente.....	27
Figura 7 - Esquema microscópico da estrutura anatômica de uma conífera.	28
Figura 8 - Esquema microscópico da estrutura anatômica de uma folhosa.....	28
Figura 9 - Distribuição de pressão.....	31
Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na lâmina de cola, na direção paralela às fibras.	32
Figura 11- Corpo de prova bi-laminado para ensaios de cisalhamento de acordo com ASTM D-905-08.....	33
Figura 12 – (a) Modelo de corpo de prova de cisalhamento com corte duplo (b) Ensaio de cisalhamento da linha de cola em corpo de prova de cisalhamento com corte duplo	33
Figura 13 - Corpo de prova de resistência ao cisalhamento na linha de cola retirado da seção transversal do elemento de MLC.....	34
Figura 14 - Dispositivo de ensaio de cisalhamento na linha de cola.	35
Figura 15 – Retirada do corpo de prova para ensaio da qualidade de colagem.	36
Figura 16 - Posicionamento dos corpos de prova em relação ao fluxo de ar, dentro da câmara climatizadora.	37
Figura 17 - Detalhes dos ensaios de caracterização mecânica das lamelas.....	45
Figura 18 - Configuração dos corpos de prova	45
Figura 19 - Prensagem das lamelas	47
Figura 20 – Corpos de prova inseridos na autoclave para ensaio de delaminação.....	48
Figura 21 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola.....	50
Figura 22 - Captura da imagem no <i>software</i> ImageJ: (a) Imagem digitalizada (scanner) (b) Imagem analisada pelo <i>software</i> ImageJ para quantificação da porcentagem.	51
Figura 23 – Exemplo de imagem capturada referente à uma superfície de ruptura do corpo de prova rompido após o ensaio de cisalhamento da linha de cola.	53
Figura 24- Identificação dos padrões considerados na análise.....	54
Figura 25 - Microscópio óptico LEICA M80 com iluminação.	55

Figura 26 - (a) Mistura adesiva de composição natural (b) aplicação do adesivo natural nas lamelas de madeira	56
Figura 27 - Prensagem dos elementos de MLC colados com adesivo natural (MgO e proteína de soja).....	57
Figura 28 - Aplicação de adesivo Poliuretano com adição de corante para produção do MLC.	59
Figura 29 - Regularização da superfície da lamela.....	60
Figura 30 - Corpos de prova para cisalhamento na linha de cola.....	60
Figura 31 - Ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola (lamelas de diferentes espessuras)	61
Figura 32 – Malha quadriculada para quantificação de porcentagem de ruptura: (a) pinus (b) eucalipto	62
Figura 33 - Resultados da influência da pressão (Pre) na D_t para as madeiras de pinus (a) e eucalipto (b).....	64
Figura 34 - Resultados dos ensaios de delaminação para os ensaios com madeiras de eucalipto e adesivo Cascophen RS 216-M.....	67
Figura 35 - Modo de ruptura mais comum na região colagem após abertura da amostra ensaiada com formão (amostra C5 (Pressão de colagem de 1,5 MPa) da viga 1 – linha de cola 4) – Eucalipto colado com adesivo Cascophen.	68
Figura 36 - Resultados da influência da pressão (Pre) (a) e da posição (Po) na f_{v0} para a madeiras de eucalipto.	69
Figura 37 - Gráfico de Pareto acerca dos efeitos isolados (Pre, Po) e do efeito de interação entre os fatores (Pre×Po) nos valores da f_{v0} para a madeira de eucalipto.	69
Figura 38 - Resultados da influência da pressão (Pre) (a) e da posição (Po) na f_{v0} para a madeiras de pinus.	70
Figura 39 - Gráfico de Pareto acerca dos efeitos isolados (Pre, Po) e do efeito de interação entre os fatores (Pre×Po) nos valores da f_{v0} (a) e gráfico de interação (b) para a madeira de pinus.	71
Figura 40 - Qualidade macroscópica das superfícies das lamelas usinadas e antes da colagem.	73
Figura 41 - Qualidade microscópica das superfícies das lamelas usinadas e antes da colagem.	73
Figura 42 – Qualidade microscópica da face das lamelas após o ensaio de cisalhamento na linha de cola.....	74

Figura 43 - Região das linhas de cola com adesivo Cascophen RS 216-M (Escala: 100 μm) analisadas por microscópio ótico (ampliação e 60 x).....	75
Figura 44 - Resultados da influência das proporções de MgO e de proteína de soja nos valores da D_t para a madeira de eucalipto.....	78
Figura 45 - Resultados da influência das proporções de MgO e de proteína de soja nos valores da D_t para a madeira de pinus.....	78
Figura 46 - Resultados da influência das proporções de MgO e de proteína de soja nos valores da f_{v0} para a madeira de eucalipto.	80
Figura 47 - Resultados da influência das proporções de MgO e de proteína de soja nos valores da f_{v0} para a madeira de pinus	81
Figura 48 - Modo de ruptura mais comum na região colagem após abertura da amostra ensaiada com formão - Eucalipto colado com adesivo natural.	81
Figura 49 - Resultados da influência da espessura (t) na f_{v0} para as madeiras de pinus (a) e eucalipto (b).....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de corpos de prova de cisalhamento na linha de cola conforme largura do elemento laminado.....	35
Tabela 2 - Limite de delaminação de acordo com o ambiente de exposição.	38
Tabela 3 - Delaminação das vigas de Pinus coladas com adesivo Cascophen RS 216 em função das pressões utilizada na fabricação.	63
Tabela 4 – Delaminação das vigas de Eucalipto coladas com adesivo Cascophen RS 216 em função das pressões de colagem utilizada na fabricação.	64
Tabela 5 – Média de resistência ao cisalhamento média das linhas de cola em função da pressão de colagem e quantificação da porcentagem de rutura na madeira através do GLT para a combinação Eucaipto/Cascophen.	68
Tabela 6 - Resultado gráfico para as resistências ao cisalhamento das linhas de cola versus níveis de pressão aplicados, para a combinação pinus / adesivo Cascophen RS216-M.	70
Tabela 7 - Comparação dos resultados médios de ruptura obtidos pelos <i>softwares</i> GLT e ImageJ.....	72
Tabela 8 - Variação das espessuras das linhas de cola dos corpos de prova analisados.	76
Tabela 9 - Delaminação das vigas de Eucalipto coladas com adesivo natural em função da pressão utilizada na fabricação	77
Tabela 10 - Delaminação das vigas de Pinus coladas com adesivo natural em função da pressão utilizada na fabricação	77
Tabela 11 - Resistência ao cisalhamento média das linhas de cola em função da proporção de colagem e para a combinação Eucalipto/MgO + Proteína de Soja.	79
Tabela 12 - Resistência ao cisalhamento média das linhas de cola em função da proporção de colagem e para a combinação Pinus/MgO + Proteína de Soja.	80
Tabela 13- Resultado para as resistências ao cisalhamento das linhas de cola conforme linha de cola (Eucalipto).....	82
Tabela 14 - Resultado para as resistências ao cisalhamento das linhas de cola conforme espessura das lamelas (Pinus).....	83
Tabela 15 - Porcentagem de ruptura na madeira conforme espessura das lamelas (Pinus)	83
Tabela 16 - Porcentagem de ruptura na madeira conforme espessura das lamelas (Eucalipto)	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM American Society for Testing and Materials

CSA Canadian Standards Association

EN European Norm

MLC Madeira Lamelada Colada

MLCC Madeira Lamelada Colada Cruzada

SF Farinha de Soja

LISTA DE SÍMBOLOS

b	- largura do corpo de prova (mm)
D_t	- delaminação total (%)
$D_{tmáx}$	- maior delaminação de uma linha de cola (%);
f_{c90}	- resistência à compressão perpendicular
f_{c0}	- compressão paralela às fibras
f_{v0}	- resistência ao cisalhamento da linha de cola (MPa);
$f_{v0,max}$	- força máxima de cisalhamento aplicada durante o ensaio (N);
L_a	- somatória das larguras das juntas abertas nas faces da seção transversal (mm);
$L_{amáx}$	- maior largura de delaminação sobre as faces da seção transversal (mm);
$L_{jmáx}$	- largura da junta que apresenta a maior delaminação (mm);
L_t	- somatória das larguras das linhas cola totais medidas antes do ensaio (mm);
t	- altura do corpo de prova (mm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2.3	JUSTIFICATIVA	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	MADEIRA LAMELADA COLADA.....	22
3.1.1	Processo produtivo de madeira lamelada colada	24
3.2	MADEIRA.....	27
3.2.1	Aspectos microscópicos da madeira	27
3.3	QUALIDADE DE COLAGEM DE MLC	29
3.3.1	Pressão de colagem	30
3.3.2	Controle da qualidade de colagem	31
3.3.2.1	Controle da qualidade de colagem no Brasil	31
3.3.2.2	Cisalhamento na linha cola - Procedimentos da Norma ABNT NBR 7190-6:2022..	34
3.3.2.3	Delaminação - Procedimentos da norma ABNT NBR 7190-6:2022.....	36
3.4	ADESIVOS NA PRODUÇÃO DE MLC	38
3.4.1	Resorcinol Formaldeído (Cascophen)	39
3.4.2	Poliuretano	40
3.4.3	Adesivo natural - Proteína de Soja e Óxido de Magnésio	40
3.5	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	41
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	ANÁLISE DE DIFERENTES PRESSÕES DE COLAGEM.....	44
4.1.1	Produção dos elementos de mlc para diferentes pressões de colagem	44
4.1.2	Classificação visual e mecânica para diferentes pressões de colagem	44
4.1.3	Colagem e prensagem das vigas	46
4.1.4	Ensaio de delaminação	47
4.1.5	Ensaio de cisalhamento na linha de cola	49
4.2	ANÁLISE DAS REGIÕES ROMPIDAS APÓS CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA.....	50
4.2.1	Softwares de análise de imagens	50
4.2.1.1	ImageJ.....	51

4.2.1.2	GLT <i>Rupture Analysis</i>	52
4.2.2	Análise microscópica	54
4.3	ANÁLISE DO ADESIVO NATURAL (Proteína de Soja e Óxido de Magnésio)....	56
4.3.1	Produção dos corpos de prova na avaliação do adesivo natural	56
4.3.2	Ensaio de delaminação e resistência ao cisalhamento na linha de cola na avaliação do adesivo natural	58
4.4	ANÁLISE DA QUALIDADE DE COLAGEM PARA LAMELAS DE DIFERENTES ESPESSURAS.....	58
4.4.1	Produção dos corpos de prova na avaliação da resistência de colagem para diferentes espessuras das lamelas	58
4.4.2	Prensagem e colagem das vigas com lamelas de diferentes espessuras	59
4.4.3	Ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola para lamelas com diferentes espessuras	60
4.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	62
5	RESULTADOS	63
5.1	INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COLAGEM NA RESPOSTA DE DELAMINAÇÃO PARA MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO COM ADESIVO CASCOPHEN RS216-M.....	63
5.1.1	Resistência média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)	67
5.1.2	Análise microscópica	73
5.1.2.1	Análise das superfícies das lamelas após o desengrosso em plaina e antes da colagem	73
5.1.2.2	Análise da face de uma das lamelas rompidas	74
5.1.2.3	Resultados das imagens das linhas de cola.....	75
5.2	MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO COM ADESIVO NATURAL	76
5.2.1	Delaminação para adesivo natural	77
5.2.2	Resistência média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)	79
5.3	ELEMENTOS DE MLC COM LAMELAS DE DIFERENTES ESPESSURAS	82
5.3.1	Resistência média ao cisalhamento da linha de cola para lamelas de diferentes espessuras (MPa)	82
6	CONCLUSÕES	86
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

A utilização da madeira na construção civil ocorre desde o início da civilização. Como consequência do amplo uso do material, técnicas construtivas foram desenvolvidas com o objetivo de obter facilidades e melhorias para as construções. A madeira lamelada colada (MLC) surgiu com a evolução destes métodos construtivos.

A MLC é um produto industrializado composto por lamelas de madeira serrada, que são dispostas com o posicionamento de suas fibras paralelos entre si e coladas com adesivo estrutural à prova d'água. Propriedades como baixo peso próprio e elevada resistência mecânica conferem ao produto a possibilidade de ser utilizado em construções com formatos e dimensões variados (PAULI, AZAMBUJA e OLIVEIRA NETO, 2021).

No Brasil, apesar da grande disponibilidade de matéria prima, os métodos construtivos que utilizam MLC ainda não são amplamente difundidos. Existe carência de acesso à informação técnica, aos processos e tecnologias para a produção de MLC, o que resulta na dificuldade de produção e conhecimento deste sistema de construção (FREITAS, MAZZARDO, 2021).

A produção, estudo e instruções normativas sobre a MLC são muito recentes no Brasil. Além disso, não existem muitos estudos conclusivos sobre os efeitos dos parâmetros de fabricação dos elementos de MLC (pressão de colagem, espessura das lamelas, entre outros) na resposta da qualidade de colagem. Não foram encontrados na literatura nacional estudos sobre a distribuição das pressões de colagem ao longo do comprimento do elemento colado.

A ABNT NBR 7190-1:2022, recomenda, respectivamente, os valores de 0,7 MPa e 1,2 MPa, para madeiras de baixa densidade ($\rho_{ap} \leq 0,5 \text{ g/cm}^3$) e de média e alta densidade ($\rho_{ap} > 0,5 \text{ g/cm}^3$). Porém, não existem estudos definindo esses valores para as madeiras cultivadas no território brasileiro. Há necessidade de estudos que comprovem a eficácia desses valores de pressão propostos para as referidas madeiras de reflorestamento.

O método de ensaio brasileiro, ABNT NBR 7190-6:2022, tem como base a norma europeia EN 14080:2013, e busca reduzir o tempo de ensaio para avaliar a qualidade de colagem em elementos de MLC através de ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola.

Por fim, não existe um método padronizado disponível para quantificação da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo após o ensaio de cisalhamento na linha de cola. Essa quantificação tem sido feita no meio técnico de forma visual, a qual apresenta imprecisão.

Com base no exposto, este trabalho visou avaliar, experimentalmente, o método de ensaio brasileiro ABNT NBR 7190-6:2022, na resposta da qualidade da colagem de elementos de MLC para diferentes combinações espécie/adesivo, incluindo um adesivo natural, considerando os parâmetros de fabricação: pressão de colagem e espessura da lamela. Pretende também avaliar por meio de microscópica óptica as regiões de colagem dos corpos de prova e antes e após a colagem. Pretende-se ainda testar o *software* de imagens “*GLT Rupture Analysis*”, desenvolvido em linguagem python, por pesquisadores da UNESP de Itapeva, sob supervisão do orientador deste trabalho, especialmente para esta finalidade, com posterior comparação dos resultados com o *software* ImageJ. Esses softwares permitem a quantificação automática da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo após a ruptura por cisalhamento da linha de cola.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o processo produtivo e a resposta da qualidade de colagem em elementos de madeira lamelada colada, com base na ABNT NBR 7190-6: 2022.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar experimentalmente a influência da pressão de colagem na resposta de delaminação e de resistência ao cisalhamento da linha de cola para madeiras de reflorestamento (*Eucalypto grandis* e *Pinus elliottii*) e adesivo Cascophen RS 216 -M;
- Verificar a relação entre a pressão e a posição das lamelas no elemento de MLC na resposta de resistência ao cisalhamento na linha de cola para madeiras de reflorestamento (*Eucalypto grandis* e *Pinus elliottii*) e adesivo Cascophen RS 216 -M;
- Analisar as superfícies de colagem antes da aplicação do adesivo, as variações das espessuras finais das linhas de cola para a melhor pressão de colagem obtida, como também as superfícies dos corpos de prova após a ruptura por cisalhamento da linha de cola;
- Comparar os resultados dos *softwares* *GLT Rupture Analysis* e *ImageJ* na quantificação de porcentagem de ruptura na região de colagem utilizando adesivo Cascophen RS 216 -M;
- Conhecer o comportamento de um adesivo natural composto por Proteína de soja e Óxido de magnésio na resposta da qualidade de colagem em madeiras de reflorestamento (*Eucalypto grandis* e *Pinus elliottii*);
- Avaliar experimentalmente a influência da espessura da lamela (1,5 cm; 2,5 cm e 3,5 cm), através do ensaio de cisalhamento na linha de cola, na resposta da qualidade de colagem considerando as melhores pressões obtidas nas etapas anteriores para a resina Cascophen RS 216 – M e madeiras de reflorestamento (*Eucalypto grandis* e *Pinus elliottii*);

2.3 JUSTIFICATIVA

Grande parte dos ensaios já realizados para análise da qualidade de colagem de elementos de MLC, no Brasil, foram realizados conforme recomendação de normas internacionais (europeia, americana e canadense) e com modelos de corpo de prova (cisalhamento ou Double Shear) propostos pela norma ABNT NBR 7190:1997. Porém, nestas situações, os corpos de prova não representam perfeitamente a real situação de colagem dos elementos de MLC e a seção dos elementos de MLC deveriam ser consideradas como parte dos elementos colados durante os ensaios de cisalhamento das linhas de cola.

O novo método de ensaio brasileiro ABNT NBR 7190-6:2022 sugere que os ensaios para análise de colagem sejam realizados com novo modelo de corpo de prova, ou seja, aqueles retirados do próprio elemento de MLC com comprimentos de 7,5 cm ou 10 cm. Além disso, a ABNT NBR 7190-6:2022, recomenda que sejam utilizados na colagem de elementos de MLC valores de 0,7 MPa e 1,2 MPa, os quais dependem da densidade da madeira utilizada. A utilização de documento normativo ainda é recente no Brasil, pois até a publicação do novo método de ensaio, os valores de pressão de colagem eram aqueles recomendados por pesquisadores e não por um documento normativo.

Outros trabalhos anteriores já desenvolvidos na mesma temática na UNESP/Itapeva (Bianchi, 2020; Lisboa 2020; Andrade 2019) consideraram o método de ensaio a ABNT NBR 7190-6:2022, porém sem realizar a verificação da influência da variação da pressão de colagem ou da espessura das lamelas na resposta da qualidade de colagem do elemento de MLC. Os ensaios desenvolvidos na UNESP/Itapeva em parceria com a EESC/USP estão sendo os primeiros ensaios realizados para testar o referido método brasileiro em diferentes combinações espécie/adesivo.

A maioria dos estudos analisados sobre MLC, realizam a quantificação da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo, nas regiões de colagem, de maneira visual. Diante disso, a proposição e teste do *software* de imagens GLT *Rupture Analysis*, desenvolvido na UNESP Itapeva, em comparação com os resultados do *software* ImageJ, que é um *software* já consolidado no mercado e amplamente utilizado para análise de imagens, busca fornecer uma ferramenta de fácil utilização e com maior rapidez e eficiência na obtenção da resposta do ensaio.

As atuais normas técnicas recomendam que os estudos relacionados à qualidade de colagem da madeira sejam baseados em ensaios macroscópicos, analisando, nesse caso, a

resistência mecânica dos elementos. Porém, as análises de microscopia podem indicar a qualidade da colagem através de uma observação mais apurada da penetração do adesivo na madeira como o adesivo, agregando outras informações sobre a utilização de determinados adesivos e processos produtivos para obtenção de produtos de qualidade.

Estrutura do Trabalho: Este trabalho foi estruturado nos seguintes itens:

- **Introdução, objetivos e justificativa:** apresenta o tema, a problemática a ser trabalhada, os motivos do estudo, e como o que se pretende abordar para a obtenção dos resultados;
- **Revisão bibliográfica:** contém as principais pesquisas e normativas sobre o tema;
- **Materiais e métodos:** contém os materiais e procedimentos utilizados na pesquisa;
- **Resultados:** apresenta os principais resultados experimentais obtidos até o momento;
- **Conclusões:** apresenta as principais conclusões obtidas até o momento;
- **Referências bibliográficas:** contém a relação de trabalhos consultados para a pesquisa;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

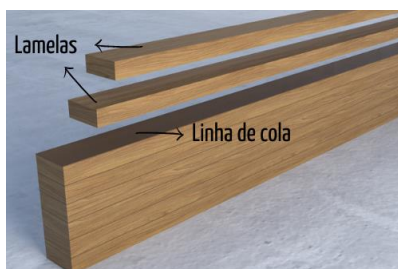
O estudo da bibliografia foi realizado ao decorrer da pesquisa baseando-se na norma ABNT NBR 7190-1:2022, ABNT NBR 7190-6:2022, Normas americanas: ASTM D2559, D4688 e D198, Normas europeias: EN 14080 e EN 408 e Normas canadenses: CSA 112.9 e CSA 112.10. Além disso, a revisão bibliográfica inclui a revisão sobre os estudos obtidos por outros pesquisadores, utilizando a base de dados *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web of Science*.

A pesquisa bibliográfica foi dividida em quatro subitens. No primeiro, encontra-se uma introdução sobre a MLC, descrevendo as principais características e o processo produtivo. O segundo subitem refere-se às propriedades macroscópicas e microscópicas da madeira. O terceiro subitem trata da qualidade de colagem da MLC, incluindo fatores que influenciam na colagem e informações sobre o controle da qualidade de colagem e as normas que estabelecem os parâmetros de verificação da qualidade dos produtos. O quarto subitem trata dos adesivos utilizados na produção de MLC.

3.1 MADEIRA LAMELADA COLADA

A madeira lamelada colada é um produto de engenharia utilizado na construção civil, que apresenta qualidades como alta capacidade de carga, sustentabilidade e baixa densidade quando comparada ao aço e ao concreto. Este produto é composto por lamelas (tábuas) de madeira unidas através de adesivo e submetidas a pressão, de maneira que ao final do processo, seja obtida um único elemento estrutural (DEPIERI, SANTOS e DA COSTA, 2020). Conforme Segundinho *et al.* (2015), a produção da MLC se dá a partir do posicionamento das lamelas de madeira de maneira paralela ao comprimento do elemento estrutural e o adesivo é aplicado nas faces das lamelas e nos topos, através de emenda *finger joint*, de forma a obter o comprimento e altura prevista para a estrutura (Figura 1).

Figura 1 - Posicionamento das lamelas para a produção de MLC



Fonte: Autor.

A produção de MLC proporciona bom aproveitamento da madeira, pois permite a dispersão dos defeitos naturais e utilização de madeiras de forma mais eficiente, devido a possibilidade de realizar a distribuição seletiva de lamelas previamente classificadas visualmente e mecanicamente. Neste caso, as lamelas são dispostas adequadamente, de maneira que as peças de maior qualidade fiquem posicionadas nas áreas de maior solicitação mecânica do elemento estrutural (MIOTTO, 2009; DUARTE, 2004).

A MLC pode ser utilizada para diversas finalidades na construção civil devido a sua boa relação entre massa e resistência mecânica e a possibilidade de vencer grandes vãos. Além disso, a plasticidade do material permite que a estrutura exiba curvatura e seções variáveis (LEITE; SANTOS; VALLE, 2017; NOGUEIRA, 2017). A Figura 2 permite a visualização de uma estrutura de MLC com formato curvo, construída pela empresa Carpinteria.

Figura 2 – Estrutura em MLC – Portaria Cerejeiras.



Fonte: Carpinteria (2022).

Porém, ainda existem resistências significativas para a difusão do produto no Brasil, causada pelo alto custo, ausência de recomendações técnicas brasileiras, baixo controle de qualidade da madeira serrada nas serrarias, ausência de adesivo competitivo produzido nacionalmente, baixa quantidade de mão de obra especializada, baixa demanda devido ao desconhecimento do produto e ausência de políticas públicas que favoreçam o setor madeireiro (FIORELLI, 2005; LEITE; SANTOS; VALLE, 2017).

3.1.1 Processo produtivo de madeira lamelada colada

A produção de MLC é realizada dentro da indústria, que recebe a madeira e realiza diversos processos até a obtenção do elemento de MLC. A ABNT NBR 7190-1:2022 estabelece os processos recomendáveis para esse processo produtivo. Durante a produção é importante que sejam utilizadas madeiras que apresentem compatibilidade de propriedades físicas e mecânicas, evitando utilizar espécies diferentes em um mesmo elemento. A densidade aparente (teor de umidade de 12%) deve estar entre $0,40 \text{ g/cm}^3$ e $0,75 \text{ g/cm}^3$.

A secagem das lamelas é realizada buscando uniformidade de teor de umidade entre lamelas. Conforme a ABNT NBR 7190-1:2022, não é permitida uma variação superior a 5% entre as lamelas adjacentes e é necessário que elas estejam completamente secas, apresentando teor de umidade máximo de 18%. Durante o processo de secagem da madeira, é importante buscar a uniformidade do teor de umidade das lamelas. Portanto, logo após a estabilização do teor de umidade, o processo de produção dos elementos deve ser iniciado.

O processo de secagem das lamelas é mais eficiente quando comparado à secagem de uma viga de madeira maciça ou mesmo uma tora inteira, pois o volume de madeira contido em uma lamela é menor em comparação a uma tora completa. Por esse motivo, as lamelas estão menos suscetíveis a sofrer alterações físicas devido à umidade. Além disso, a secagem das lamelas é mais rápida em comparação à secagem de toras inteiras (PAULI; AZAMBUJA; OLIVEIRA NETO, 2021).

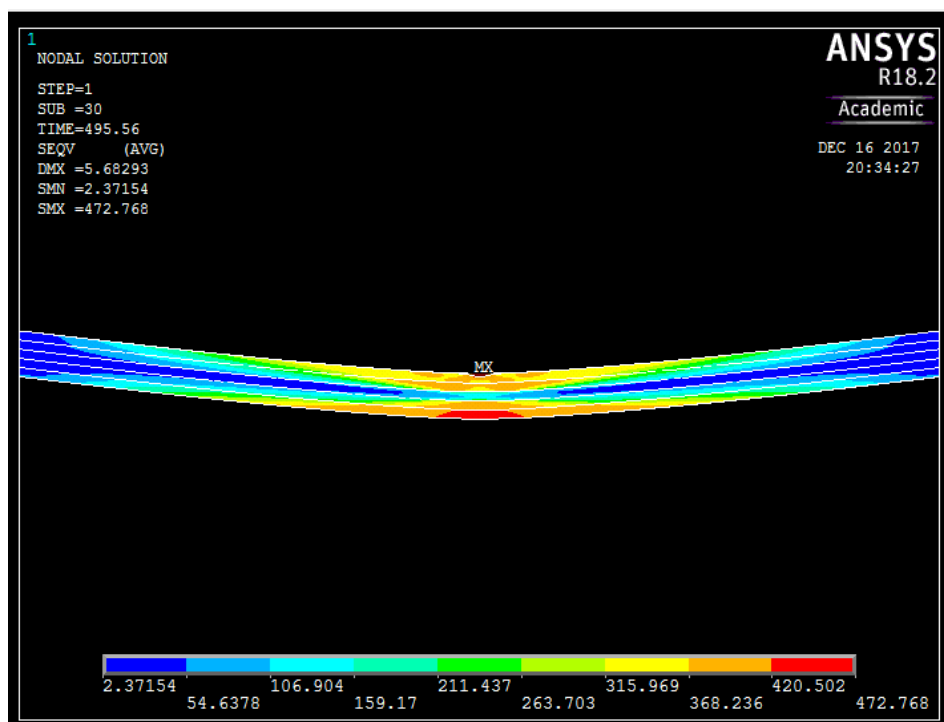
Após a secagem, é realizada a classificação visual das lamelas, realizando inspeção visual dos defeitos encontrados na madeira de forma a verificar as duas faces e as bordas de cada peça. Essa classificação tem como propósito classificar peças ou seções de acordo com seus defeitos, evitando a redução da qualidade do elemento de MLC produzido. A classificação é realizada de forma estratégica, selecionando e posicionando as lâminas que apresentam a melhor qualidade nas camadas de maior solicitação (GOMES, 2018; ABNT NBR 7190-2:2022).

Além da classificação visual, também é realizada a classificação mecânica, que se baseia na verificação do módulo de elasticidade (E_m) através de ensaio mecânico não destrutivo e densidade de cada lamela. Com a obtenção dos valores do módulo de (E_m), é possível realizar o agrupamento de lotes de lamela conforme os valores obtidos, possibilitando a distribuição das lamelas durante a produção do elemento de MLC (ABNT NBR 7190-2:2022).

A Figura 3 mostra a simulação da distribuição das tensões em vigas submetidas ao ensaio de flexão, possibilitando reconhecer as camadas mais externas da viga como as regiões de maior solicitação de resistência. Portanto, é a região em que as lamelas de maior qualidade são

posicionadas durante a produção da MLC. Por outro lado, a região central da lamela apresenta menor solicitação, sendo possível utilizar lamelas com menores módulos de elasticidade e menores classificações na avaliação visual (GOMES, 2018).

Figura 3 - Avaliação das tensões na viga de MLC - Tensões de von Mises em kgf/cm^2 .



Fonte: Gomes (2018).

Para a obtenção do comprimento desejado para os elementos de MLC, é necessário que haja uma união longitudinal entre as lamelas. A união é realizada através da colagem de entalhes múltiplos usinados, também conhecidos como emendas denteadas (Figura 4), nas extremidades das tábuas. Estas emendas garantem a continuidade das lamelas permitindo elementos estruturais com comprimento significativo, além de possibilitar a remoção de defeitos em pequenas seções da peça, de forma a aumentar o aproveitamento da madeira (ABNT NBR 7190-1:2022; APRILANTI, 2010).

Figura 4 - Emendas de topo denteadas



Fonte: ITA CONSTRUTORA (2023).

Com as lamelas previamente secas, classificadas mecânica e visualmente e com união longitudinal realizadas, inicia-se o processo de adequação da superfície da madeira, para que a aplicação do adesivo seja eficiente. Nesta etapa, as lamelas são aplainadas (Figura 5), obtendo uma superfície regular e adequada para o espalhamento e penetração do adesivo. Logo após ocorre o posicionamento das lamelas conforme a classificação visual e mecânica realizadas (MIOTTO, 2009).

Figura 5 - Aplainamento das lamelas.



Fonte: ITA CONSTRUTORA, 2023.

Após o processo de aplainamento das lamelas, as mesmas estão aptas para receber o adesivo. É importante que o adesivo utilizado na produção de MLC seja adequado para o uso estrutural, garantindo a durabilidade e integridade à peça. A quantidade e parâmetros de aplicação de adesivo pode variar dependendo do tipo de adesivo utilizado, sendo importante verificar as especificações do fabricante do produto (CAVALHEIRO RAQUEL, 2018; ABNT NBR 7190-2022).

Para a colagem adequada, é necessário que o elemento de MLC passe pelo processo de prensagem das lamelas. Durante a prensagem, ocorre a fixação e cura completa do adesivo, de maneira a obter a adesão ideal de colagem. Conforme a ABNT NBR 7190-1:2022, recomenda-

se que a pressão de colagem mínima seja de 0,7MPa para madeiras com densidade inferior a 0,5g/cm³ e 1,2MPa para madeiras com densidade superior a 0,5 g/cm³.

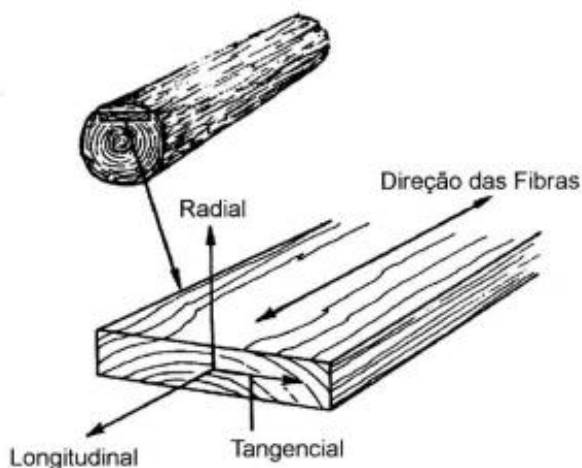
Após o período de cura do adesivo, os elementos de MLC são retirados da prensa e são submetidos ao processo de acabamento e adequação nas dimensões planejadas. É realizada a remoção dos adesivos residuais nas laterais dos elementos de MLC através de aplainamento e realizados os cortes e finalizações necessárias para o produto (MIOTTO, 2009).

3.2 MADEIRA

De forma geral, várias espécies de madeira podem ser usadas na confecção de elementos de MLC. Porém é importante o estudo prévio da combinação espécie/adesivo tendo em vista a resposta da qualidade de colagem.

Macroscopicamente a madeira tem natureza ortotrópica e é formada por três principais direções ortogonais (radial, tangencial e longitudinal), conforme ilustra a Figura 6. Em cada uma das direções a madeira apresenta diferentes propriedades mecânicas (RITTER, 1990).

Figura 6 - Direções ortogonais da madeira vistas macroscopicamente.



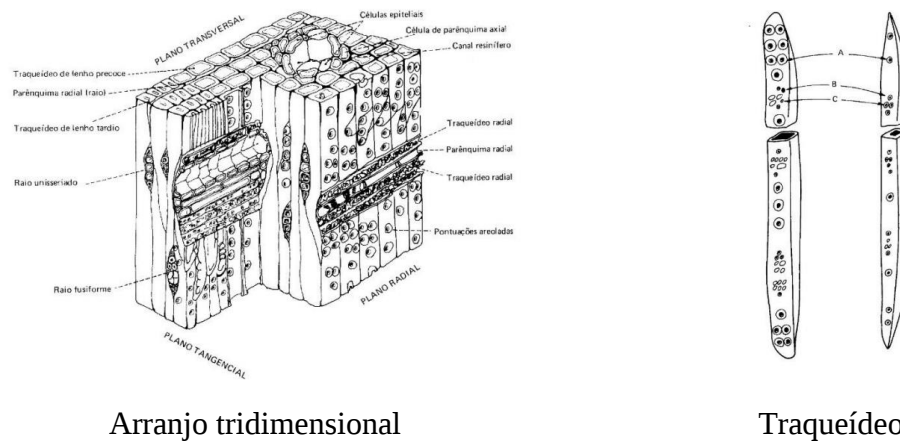
Fonte: Ritter (1990).

3.2.1 Aspectos microscópicos da madeira

Do ponto de vista microscópico, as coníferas (pinus) apresentam uma estrutura simples, constituída por uma maioria de células compridas e delgadas, denominadas traqueídeos, as quais apresentam pontuações (pequenas aberturas) e formam os lenhos tardio (mais resistente e compacto) e precoce. Os traqueídeos são responsáveis pelo suporte mecânico. Também

existem os raios fusiformes e os parênquimas radiais (responsáveis pelo transporte de substâncias alimentares). A Figura 7 ilustra o arranjo tridimensional relacionado a anatomia de uma conífera e a estrutura de um traqueídeo (RITTER, 1990).

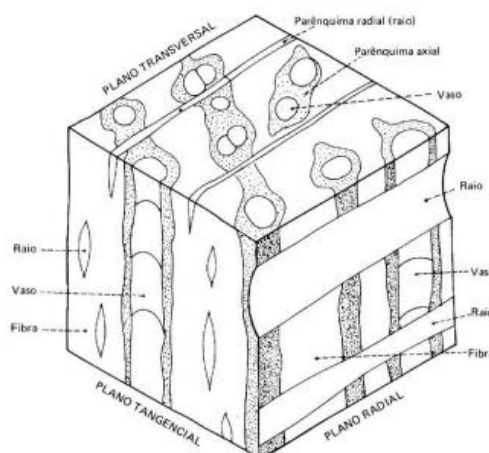
Figura 7 - Esquema microscópico da estrutura anatômica de uma conífera.



Fonte: Pereira (2015).

Por outro lado, as folhosas (eucaliptos) têm um arranjo relativamente mais complexo que as coníferas, formado basicamente por três elementos: vasos (estruturas verticais para o transporte de seiva), fibras (tecido com maior espessura e menor diâmetro que os traqueídeos das coníferas e tem função de suporte mecânico), raios heterocelulares e parênquimas radiais (também responsáveis pelo transporte de substâncias e dispostos na direção radial). A Figura 8 ilustra o arranjo tridimensional da madeira de folhosa.

Figura 8 - Esquema microscópico da estrutura anatômica de uma folhosa.



Fonte: Pereira (2015).

3.3 QUALIDADE DE COLAGEM DE MLC

Em um cenário em que a madeira sólida de qualidade está escassa, a colagem de madeira apresenta-se como solução na indústria moderna, pois permite o aproveitamento mais racional da matéria prima, através do aproveitamento de peças de madeira de menores dimensões. A utilização do recurso de colagem reduz a exigência em qualidade da madeira. Por outro lado, deve-se garantir a qualidade do adesivo utilizado, o conhecimento sobre interação entre a espécie e o adesivo utilizados e o processo de produção, pois estes itens estão amplamente relacionados com a qualidade do produto (LIMA *et al*, 2008).

A união adesiva é influenciada pelas propriedades da madeira e, em geral, madeiras de coníferas apresentam maior facilidade de colagem que madeiras de folhosas. As propriedades anatômicas, como: cerne, alburno, lenho juvenil e adulto, bem como lenho reação e direção da grã, afetam a colagem de madeira direta. Dentro de uma espécie madeira, pode ocorrer variação de densidade e porosidade e, conseqüentemente, variação na qualidade de colagem (CALIL NETO, 2011).

De acordo com Cavalheiro (2018), o adesivo utilizado para a produção de MLC deve ser durável, de forma a manter a integridade durante toda a vida útil do produto. Para garantir a qualidade da colagem, o adesivo utilizado em estruturas deve produzir ligações com a madeira, garantindo a durabilidade conforme as condições de uso necessárias. São utilizados diversos adesivos para a produção de MLC, entre eles, os isocianatos e os adesivos à base de formaldeído, como uréia-formaldeído (UF), melamina formaldeído (MF), melamina-uréia-formaldeído (MUF), resinas fenólicas ou fenol formaldeído (PF), resorcinol-formaldeído, entre outras (CAVALHEIRO, 2018).

Para a obtenção da qualidade de colagem, deve existir adesão e coesão adequadas. A adesão é a força de união entre adesivo e superfície a ser colada e coesão são as forças que atraem moléculas iguais, é o que mantém as moléculas do adesivo unidas. Portanto, para obter a qualidade de colagem, o adesivo deve se espalhar por toda a superfície do material e aderir-se ao mesmo, de maneira a permitir a transferência de carga (CARNEIRO, 2010).

De acordo com Jesus e Calil Junior (2000), existem parâmetros importantes que influenciam o processo de adesão do adesivo, que são: tempo de pressão, viscosidade, gramatura e tempo de cura do adesivo e a pressão aplicada durante a colagem.

3.3.1 Pressão de colagem

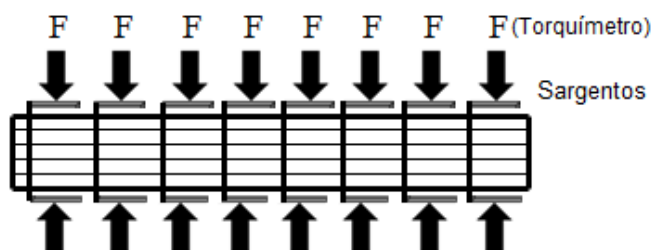
O controle da pressão de colagem é de extrema importância para a obtenção da qualidade do elemento de MLC. Ao aplicar pressão durante o processo de colagem, o adesivo entra em contato molecular com a superfície da madeira, forçando-o a penetrar na estrutura, de maneira a ocorrer uma ligação entre adesivo. Conforme a pressão é aplicada ao elemento de MLC, a camada adesiva adquire uma espessura estreita e contínua, que deve obter a espessura de 76 a 152 μm . Diante disso, existe uma pressão ideal de colagem a depender a densidade da madeira, pois, se a pressão de colagem for muito alta, o adesivo pode penetrar em excesso nos poros da madeira, causando falhas na linha de cola e diminuindo a qualidade de colagem. Por outro lado, se a pressão for muito baixa, não haverá a ligação suficiente entre madeira e adesivo (VICK, 1999).

De acordo com Burdulu *et al.* (2007), a resistência de colagem está relacionada com a maior pressão de colagem, devido ao aumento da penetração e ancoragem do adesivo nas cavidades da madeira. Porém, a pressão excessiva pode causar sobrepenetração, gerando uniões de baixa resistência.

A distribuição de pressão nas vigas de madeira laminada colada (MLC) refere-se ao controle e aplicação adequada da pressão durante o processo de fabricação desses elementos estruturais. Durante a produção das vigas de MLC, as lamelas de madeira são posicionadas uma sobre a outra, com suas faces em contato, e unidas utilizando adesivos estruturais. Nesse processo, a aplicação de pressão desempenha a função de garantir uma adesão adequada entre as lâminas e criar uma estrutura coesa e resistente.

A distribuição de pressão de colagem é realizada no sentido longitudinal da peça, conforme Figura 9. Conforme Scapinello (2021) deve-se realizar a retirada da pressão de madeira gradativa em pontos alternados ao longo do comprimento da peça. Essa distribuição permite que o adesivo seja comprimido, penetrando na madeira e maximizando a área de contato entre as lamelas. Vale mencionar que quando uma carga F é aplicada na superfície da peça, ocorre o espraçamento das cargas em 45° , de forma semelhante ocorre com as rodas dos veículos sobre um tabuleiro de ponte. Portanto, vários pontos de aplicação de carga distribuem melhor a pressão aplicada

Figura 9 - Distribuição de pressão



Fonte: Autor.

3.3.2 Controle da qualidade de colagem

Os ensaios necessários para avaliar a qualidade de colagem de elementos de MLC são os ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, com análise complementar o tipo de ruptura ocorrido na região de colagem após a ruptura por cisalhamento da linha de cola.

De forma geral, observa-se que os ensaios de qualidade de colagem de elementos de MLC realizados até o momento no Brasil, utilizaram modelos de corpo de prova conforme eram indicados na ABNT NBR 7190:1997 – Anexo B, e outras normas estrangeiras.

A norma técnica de estruturas de madeira ABNT NBR 7190:1997 não apresentava procedimentos específicos para o controle da qualidade de MLC. Porém, alguns métodos de ensaio, associados à norma atual ABNT NBR 7190:2022, propõem novos métodos de ensaio para verificação da qualidade de colagem de MLC e CLT, classificação visual e mecânica de lamelas de madeira, secagem e verificação de desempenho estrutural de madeiras maciças e produtos derivados à base de madeira.

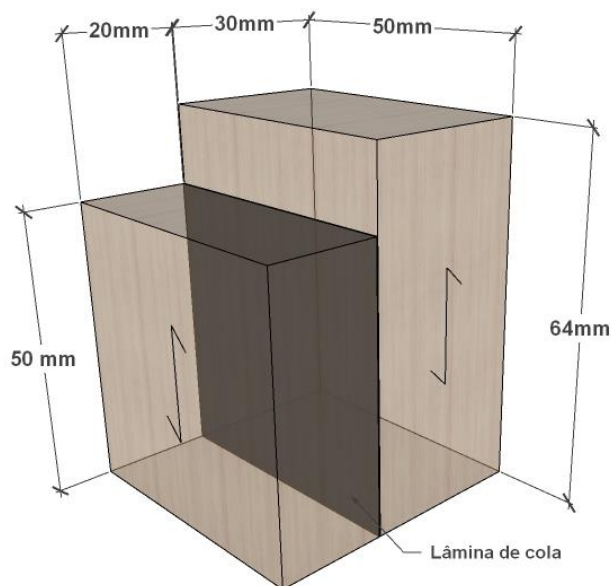
Entre estes métodos, consta-se o método de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural (ABNT NBR 7190-6:2022), que propõe a avaliação da qualidade de colagem da MLC, com o intuito de orientar as indústrias brasileiras de MLC sobre a metodologia de verificação da qualidade dos produtos.

3.3.2.1 Controle da qualidade de colagem no Brasil

A ABNT NBR 7190:1997 recomendava que o ensaio de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras da madeira lamelada colada fosse realizado em corpo-de-prova prismático e que o valor seja obtido pela máxima tensão de cisalhamento suportada pela

linha de cola. A Figura 10, ilustra o formato e as dimensões dos corpos de prova utilizados para o ensaio, bem como o posicionamento da linha de cola em relação às fibras da madeira.

Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na lâmina de cola, na direção paralela às fibras.

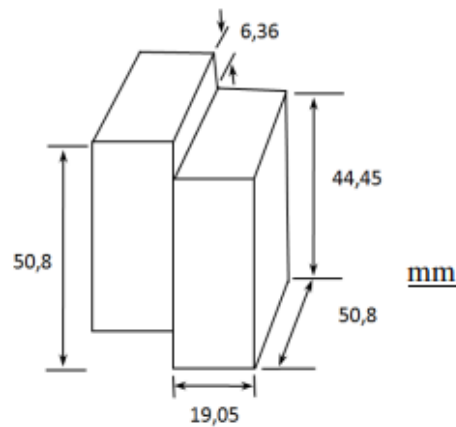


Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190: 1997.

De acordo com Serrano (2013), o modelo de corpo de prova de cisalhamento recomendado pela ABNT NBR 7190:1997, pode apresentar resultados imprecisos pois podem ocorrer esmagamentos na base do corpo de prova, o que gera uma influência negativa nos resultados de resistência obtidos.

A Norma ASTM D-905-08 também recomenda um modelo específico para ensaios de cisalhamento, que são utilizados para o teste de colagem de MLC no Brasil. A autora citada anteriormente, Serrano (2013), utilizou o modelo de corpo de prova em questão (Figura 11) para a análise do cisalhamento no plano de cola.

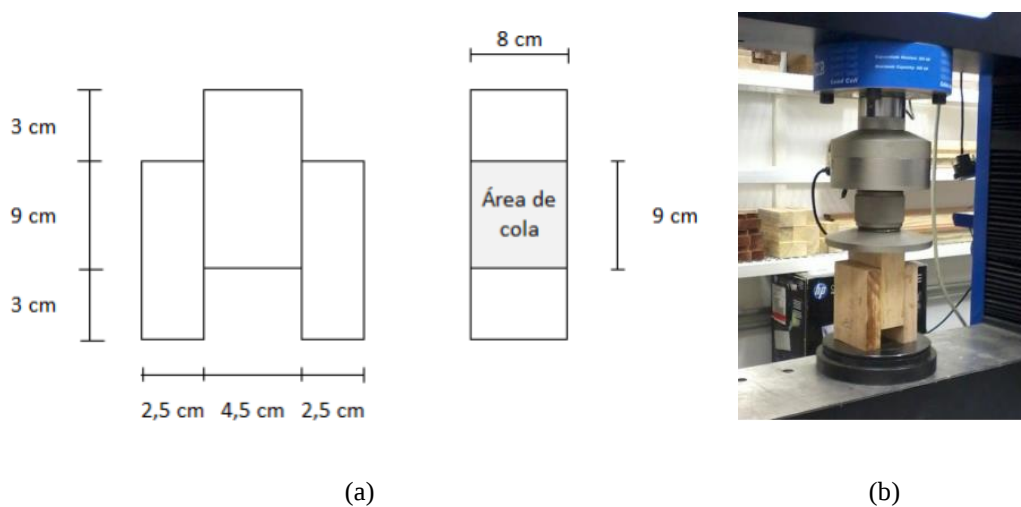
Figura 11- Corpo de prova bi-laminado para ensaios de cisalhamento de acordo com ASTM D-905-08.



Fonte: Serrano (2013).

O corpo de prova denominado “*Double shear*” ou “Corte Duplo”, recomendado pela ABNT NBR 7190:1997 para ensaios de ligações com pinos metálicos e pela American Institute of Timber Construction (AITC) (2007) para ensaios de cisalhamento, também é recorrentemente utilizado para ensaios de cisalhamento na linha de cola. Araújo (2015), realizou a avaliação do efeito da umidade da madeira na resistência ao cisalhamento da linha de cola, utilizando o modelo mencionado (Figura 12). O modelo de corpo de prova também foi utilizado por Cavalheiro (2014) e Calil Neto (2011), em testes de controle de qualidade de colagem.

Figura 12 – (a) Modelo de corpo de prova de cisalhamento com corte duplo (b) Ensaio de cisalhamento da linha de cola em corpo de prova de cisalhamento com corte duplo



Fonte: Araújo (2015).

Além do ensaio de cisalhamento da linha de cola, o controle da qualidade de colagem de elementos de MLC também é feito através da análise de delaminação dos corpos de prova colados. A norma ABNT NBR 7190:1997 não apresenta método de ensaio para delaminação, porém, a norma ABNT NBR 7190-6:2022 apresenta um método de ensaio baseado na norma EN 14080:2013.

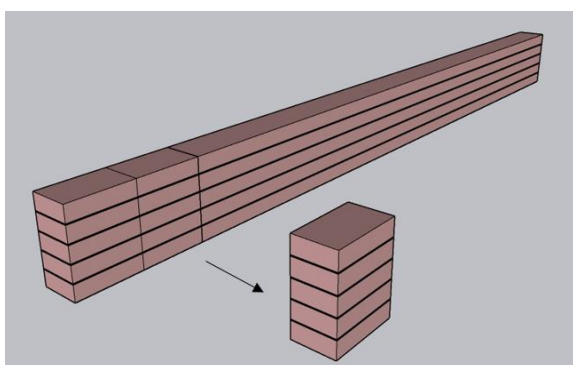
Algumas normas estrangeiras como a norma canadense (CSA 112.9:2004 e CSA 112.10) e americana (ASTM D 2559:2004), também propõe métodos para ensaio de delaminação de elementos de MLC. Porém, estes procedimentos exigem muito tempo de ensaio, como no caso da norma canadense, que totaliza 12 dias de ensaio. O método proposto na norma ABNT NBR 7190-6:2022, busca reduzir o tempo de ensaio, de maneira a agilizar a obtenção dos resultados.

Os procedimentos de análise de qualidade de colagem (cisalhamento e delaminação nas linhas de cola) descritos na norma ABNT NBR 7190-6:2022 são baseados nas normas europeias EN 14080:2013 para ambiente externo.

3.3.2.2 Cisalhamento na linha cola - Procedimentos da Norma ABNT NBR 7190-6:2022

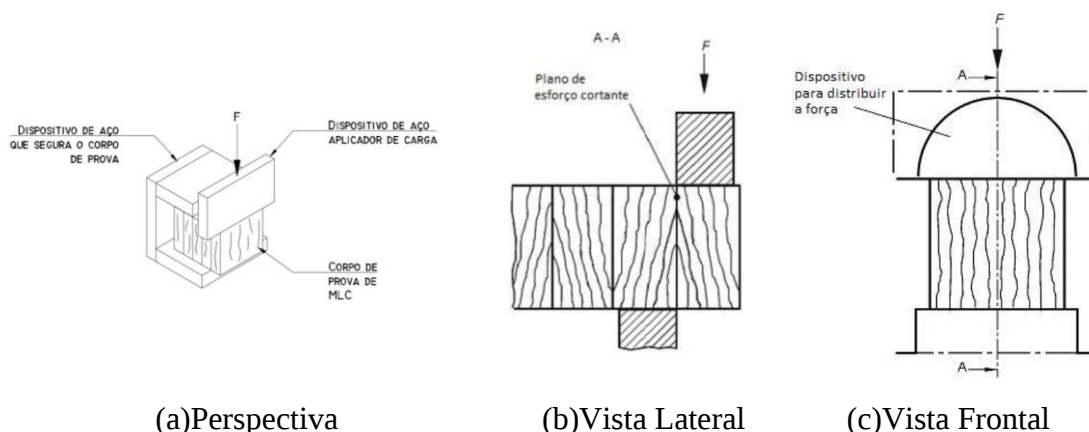
Para o ensaio de avaliação da resistência ao cisalhamento nas linhas de cola, o corpo de prova deve ser retirado de uma parte da seção transversal do elemento de MLC (Figura 13) e ensaiado em dispositivo conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 13 - Corpo de prova de resistência ao cisalhamento na linha de cola retirado da seção transversal do elemento de MLC.



Fonte: Autor.

Figura 14 - Dispositivo de ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: ABNT NBR 7190-6:2022.

Os corpos de prova retirados da seção transversal do elemento estrutural são marcados de maneira a possibilitar a posterior identificação da viga em que foi retirado. A Figura 15 apresenta o corpo de prova utilizado para o referido ensaio. A espessura (t) deve ser igual a 100 mm, a largura (b) e o comprimento (l), não apresentam dimensão definida, mas devem ser os maiores possíveis e a quantidade de corpos de prova retirados do elemento colado, deve seguir as recomendações expressas na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de corpos de prova de cisalhamento na linha de cola conforme largura do elemento laminado.

Largura do elemento laminado (mm)	Número de corpos de prova
≤ 100	1
>100 e ≤ 160	2
>160	3

Fonte: ABNT NBR 7190-6:2022.

Deverão ser ensaiados o mínimo de 3 linhas de colas da parte superior do corpo de prova, 3 da parte central e 3 da parte inferior. Para os corpos de prova com menos de 10 linhas de cola, todas deverão ser ensaiadas.

A força de cisalhamento aplicada deve ser paralela a fibra da madeira até a ruptura do corpo de prova. Após o ensaio, é necessário registrar o valor da resistência ao cisalhamento na linha de cola e a analisar a superfície da superfície cisalhada, identificando a porcentagem de falha na madeira.

A resistência ao cisalhamento na linha de cola é obtida através da Equação (1):

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b \cdot t} \quad (1)$$

onde

f_{v0} = resistência ao cisalhamento da linha de cola (MPa);

$f_{v0,max}$ = força máxima de cisalhamento aplicada durante o ensaio (N);

b = largura do corpo de prova (mm)

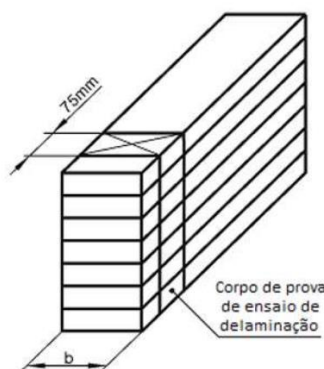
t = altura do corpo de prova (mm)

Os resultados do ensaio de cisalhamento na linha de cola devem apresentar a estimativa da área de ruptura em relação à área total submetida ao cisalhamento.

3.3.2.3 Delaminação - Procedimentos da norma ABNT NBR 7190-6:2022

No ensaio de delaminação, as medidas das aberturas (descolamento das lamelas) das linhas de cola são determinadas em ambas as faces da seção transversal da amostra (Figura 11). Os corpos de prova utilizados no ensaio devem representar a produção de MLC e ser extraídos de elementos estruturais de MLC na faixa de umidade de $12\% \pm 2\%$. A amostra deve ser retirada da seção transversal do elemento de MLC e cortada perpendicularmente às fibras, conforme dimensões da Figura 15.

Figura 15 – Retirada do corpo de prova para ensaio da qualidade de colagem.

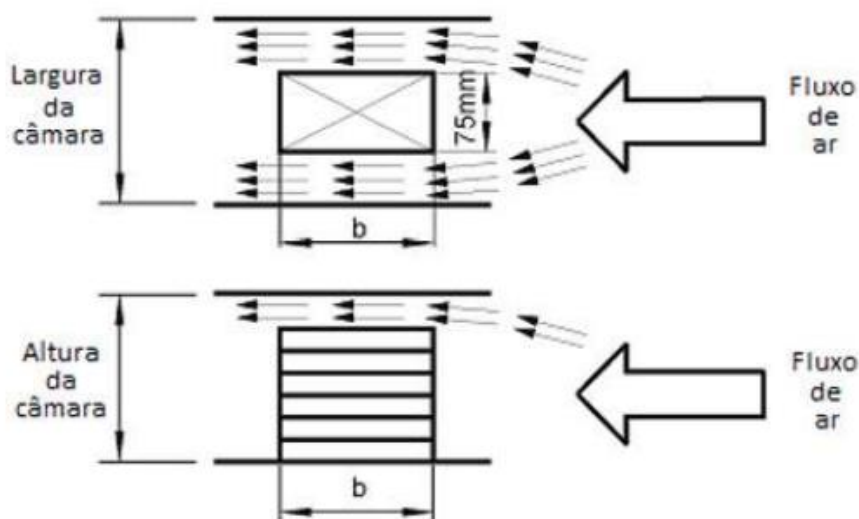


Fonte: ABNT NBR 7190-6:2022.

Para determinar a delaminação de colagem dos corpos de prova é necessário determinar o comprimento de cada linha de cola transversal, com precisão de 0,1mm, antes do ensaio. São definidos dois procedimentos diferentes de colagem, diferenciando-se pelo tipo de adesivo utilizado: para uso exterior e para uso interior.

No procedimento para ensaio de delaminação para adesivos de uso exterior, a massa dos corpos de prova deve ser determinada e eles devem ser colocados em autoclave. Na primeira etapa, realiza-se a introdução de água a uma temperatura entre 10°C e 20°C até a submersão completa dos corpos de prova e então, aplicar vácuo entre 70 kPa e 85kPa, mantendo-o por 30 minutos. Na etapa seguinte, o vácuo deve ser retirado e substituído por pressão de 500kPa a 600kPa, por um período de 2 horas. Após esse período, os corpos de prova são retirados da autoclave e submetidos a secagem em estufa com ventilação forçada de ar em uma faixa de temperatura de 65°C e 75°C, com umidade relativa de 8% a 10% e velocidade do ar entre 2m/s e 3 m/s, posicionados com a distância de 5cm um do outro e conforme a Figura 16.

Figura 16 - Posicionamento dos corpos de prova em relação ao fluxo de ar, dentro da câmara climatizadora.



Fonte: ABNT NBR 7190-6:2022.

O procedimento para adesivos de uso interior é o mesmo realizado para adesivos de uso externo, porém, as duas etapas de vácuo e pressão devem ser realizadas duas vezes, completando 5 horas de ensaio.

A determinação de porcentagem de delaminação é realizada através do cálculo utilizando a Equação (2):

$$Dt = \frac{La}{Lt} \cdot 100 \quad (2)$$

Sendo:

Dt = delaminação total (%)

La = somatória das larguras das juntas abertas nas faces da seção transversal (mm);

Lt= somatória das larguras das linhas cola totais medidas antes do ensaio (mm);

Para expressar os resultados, é realizado o registro dos locais com uniões afetadas por nós ou outros defeitos da madeira, para que sejam excluídas na determinação da delaminação total. Valores de delaminações isoladas inferiores a 2,5mm e localizadas a mais de 5mm da delaminação mais próxima, também devem ser excluídas da determinação. Informações sobre a colagens deficientes também devem ser registradas. A Tabela 2 apresenta a máxima delaminação permitida após a realização do procedimento.

Tabela 2 - Limite de delaminação de acordo com o ambiente de exposição.

Ambiente de exposição	Tipo de procedimento	Coníferas	Folhosas
Externo	Externo	4%	6%
Externo protegido	Externo	6%	8%
Interno	Interno	8%	10%

Fonte: ABNT NBR 7190-6:2022.

A porcentagem de delaminação máxima de uma linha de cola, deve ser menor ou igual a 30%. Essa determinação é calculada através da Equação (3).

$$Dt = 100 \cdot \frac{La_{max}}{Lj_{max}} \quad (3)$$

Sendo:

$Dt_{máx}$ = maior delaminação de uma linha de cola (%);

$La_{máx}$ = maior largura de delaminação sobre as faces da seção transversal (mm);

$Lj_{máx}$ = largura da junta que apresenta a maior delaminação (mm);

Nos casos em que a delaminação total ultrapassar os valores estabelecidos na Tabela (2), todo o ciclo deve ser realizado novamente com novos corpos de prova. A delaminação do segundo ciclo não deverá exceder 10%, tanto para coníferas, quanto para folhosas.

3.4 ADESIVOS NA PRODUÇÃO DE MLC

A utilização de adesivos adequados para a estrutura de MLC é de extrema importância para a obtenção de produtos de qualidade. Os adesivos utilizados tais estruturas devem apresentar resistência mecânica elevada, por isso a utilização de adesivos estruturais. É necessário que haja ligação sólida entre as lamelas de madeira e o adesivo, de maneira a garantir

a durabilidade da estrutura. Existe também a necessidade de que os adesivos utilizados para a produção de MLC apresentem resistência à umidade e condições climáticas adversas. Por se tratar de uma peça estrutural, é importante que não haja enfraquecimento das ligações entre adesivo e madeira, mesmo quando exposto à água, umidade ou alterações temperatura.

Os compósitos de madeira, quando produzidos com adesivos, oferecem possibilidades eficientes para a utilização das fibras de madeira, permitindo a obtenção de produtos com uma ampla variedade de formas e dimensões que não seriam facilmente alcançadas com o uso exclusivo da madeira maciça (CAVALHEIRO, 2018).

Além de ampliar as possibilidades de formas e dimensões, a utilização de adesivos para a produção de painéis de madeira também se apresenta como uma opção sustentável. Recursos madeireiros são aproveitados através da união entre madeira e adesivo, de maneira que madeiras de reflorestamento podem ser utilizadas na produção de grandes estruturas (GOMES, 2018).

Diferentes tipos de adesivos são utilizados na produção de MLC, sendo os adesivos à base de formaldeído os mais utilizados na indústria madeireira. Resinas termoendurecedoras à base de formaldeído são amplamente utilizadas devido a facilidade de fabricação e baixo custo. Entre os adesivos a base de formaldeído, estão os seguintes adesivos: uréia formaldeído, melamina formaldeído, melamina-uréia-formaldeído, resinas fenólicas e resorcinol-formaldeído (CAVALHEIRO, 2018).

3.4.1 Resorcinol Formaldeído (Cascophen)

A produção de vigas estruturais de madeira comumente emprega adesivos à base de resorcinol, que oferecem vantagens significativas, como alta resistência e a possibilidade de cura do adesivo em temperatura ambiente (até 50°C). Esses adesivos são especialmente adequados para produtos que requerem resistência à água e são indicados para aplicações sujeitas a exposição temporária ou permanente a intempéries (PIZZI, 1983; CAVALHEIRO, 2014; ALBINO, 2009).

Devido sua alta reatividade, o resorcinol formaldeído apresenta cura em temperatura ambiente, não havendo necessidade de prensagem a quente. Por isso, é amplamente utilizado na fabricação de MLC e outras aplicações, como até mesmo em barcos, pois permite ser utilizado para estruturas exposta ao ar livre e regiões úmidas. No entanto, este adesivo tem custo elevado, o que encarece o produto (CALIL NETO, 2011; CAVALHEIRO, 2018).

3.4.2 Poliuretano

A resina poliuretana é utilizada na colagem de madeira devido suas propriedades de resistência mecânica e intemperismos. Além disso, ela possui a capacidade de cura a temperatura ambiente (JESUS, 2000).

A resina poliuretana possui ampla capacidade de inibir a absorção de água, apresentando-se como excelente alternativa para produção de painéis à base de madeira. Além disso, apresenta fácil aplicação, boa resistência e consistência sólida. CELESTINO, 2020). Diante da utilização de diversos adesivos tidos como insalubres devido a emissão de componentes tóxicos, os adesivos poliuretanos apresentam-se como uma alternativa ambientalmente correta, pois não apresentam emissões nocivas às pessoas e ao ambiente (BIANCHI, 2020; GROTTTO; HEMKEMEIER e ROSSATO, 2020)

3.4.3 Adesivo natural - Proteína de Soja e Óxido de Magnésio

Nos dias atuais são utilizados adesivos como Ureia-formaldeído (UF) para a produção de compósitos de madeira, porém, este produto pode trazer riscos severos à saúde. Entre os anos 1930 e 1960, a proteína de soja era utilizada como adesivo de madeira, no entanto, não apresentava a resistência de ligação necessária para o uso estrutural, portanto, foi gradativamente substituída por outros adesivos mais resistentes, porém, menos aceitos no âmbito ambiental (United States Patent ,2016; JANG; LI, 2015).

Em tempos históricos, as proteínas de leguminosas, como é o caso da proteína de soja, eram utilizadas como substância adesiva para a união de madeira e papel. A ligação era mantida forte, desde que não exposta a umidade, pois o contato com a água gera enfraquecimento e deterioração da colagem (PIZZI, 1983).

Estudos sobre modificações adesivos de proteína de soja estão sendo desenvolvidos com o intuito de modificar a estrutura físico-química e melhorar as propriedades de adesão e de resistência à água (XU; HAN; LI; LUO; SHI; LI; GAO; MAO, 2022).

Jang e Li (2015), desenvolveram um adesivo utilizando farinha de soja (SF), óxido de magnésio (MgO) e água. Inicialmente, a mistura apresentou propriedades adesivas adequadas para a colagem de madeira. O adesivo natural SF – MgO é baseado unicamente em materiais naturais, não contem produtos de base petroquímica e, portanto, é muito sustentável

e ambientalmente seguro. O adesivo SF-MgO tem sido usado recentemente na produção de painéis de compensado.

Balducci et. al (2022) desenvolveu um novo bioadesivo para painéis aglomerados à base de materiais naturais: farinha de soja, óxido de magnésio (MgO) e um hidrolisado enzimático de origem vegetal, baseado nos estudos de Jang e Li (2015). O MgO foi usado para facilitar a solubilidade em água da farinha de soja. A solubilidade e o teor de proteína podem ser ainda mais aprimorados pela adição do hidrolisado de proteína. A combinação dos materiais naturais (farinha de soja, MgO e hidrolisado enzimático de origem vegetal) mostrou bom potencial para o desenvolvimento de adesivos isentos de formaldeído para painéis aglomerados. Com base nos resultados gerais, a combinação dos materiais naturais (farinha de soja, MgO e hidrolisado enzimático de origem vegetal) mostrou bom potencial para o desenvolvimento de adesivos isentos de formaldeído para painéis aglomerados.

3.5 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

De um modo geral, observa-se que os trabalhos presentes na literatura nacional sobre qualidade de colagem consideram modelos de corpos de prova colados confeccionados com base no modelo do corpo de prova isento de defeito, conforme a norma ABNT NBR 7190-6:2022 sem considerar a real seção da peça de MLC analisada. Outros trabalhos consideram corpos de prova colados baseados no ensaio de cisalhamento duplo (*Double Shear*) não condizendo com a real situação de colagem do elemento estrutural original analisado. Também foram encontrados corpos de prova de teste baseados na ASTM D-905-08 que utiliza peças b laminadas sem considerar a seção real do elemento. Porém, nos ensaios de qualidade de colagem é interessante que se considere amostras de MLC compostas pela própria seção transversal do elemento com comprimentos de 7,5 cm e 10 cm a exemplo do que propõe o método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022.

Não foram encontrados na literatura trabalhos que considerem influência da variação da pressão de colagem de elementos de MLC na resposta de delaminação e resistência ao cisalhamento da linha de cola baseados no método de ABNT NBR 7190-6, por ser este um documento ainda recente no Brasil, já que o mesmo foi publicado em 29/06/2022;

Outros trabalhos desenvolvidos na mesma temática na UNESP/Itapeva consideraram o método de ensaio, ABNT NBR 7190-6:2022 sem a verificação da influência da variação da pressão de colagem na resposta do elemento de MLC.

Não foram encontrados na literatura trabalhos numéricos sobre a variação da pressão de colagem em elementos de MLC para avaliação do cone de tensões (espraiamento das tensões) que ocorre durante a fabricação da peça de MLC ao longo do comprimento; e não existem recomendações normativas nacionais específicas de pressão de colagem para elementos MLC. A única recomendação normativa está presente na norma ABNT NBR 7190-6:2022 e estes valores precisam ser testados em trabalhos de pesquisa.

A distribuição das tensões que ocorrem na madeira durante a aplicação de pressão, é de baixo conhecimento. A simulação numérica, é uma importante ferramenta para verificar os aspectos de interesse, como a distribuição das tensões nas regiões de maior solicitação mecânica. Porém, não existem trabalhos de simulação numérica na literatura, que avaliem a distribuição dessas tensões e os esmagamentos que ocorrem em função da pressão aplicada.

A utilização do *software* GLT *Rupture Analysis* trata avanços na quantificação da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo na região de colagem, sendo de fácil utilização e fornecendo um resultado com relativa precisão e rapidez.

Também não foram encontrados na literatura trabalhos avaliando a espessura das lamelas na resposta da qualidade de colagem a partir da ABNT NBR 7190-6: 2022.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais utilizados na produção dos elementos de MLC, bem como as metodologias utilizadas nos ensaios experimentais. Para a produção dos elementos de MLC foram utilizadas madeiras das espécies de reflorestamento *Eucalyptus grandis* e de *Pinus elliottii* (sem tratamento) com umidade de $12\% \pm 1$. Foram utilizados três tipos de adesivo na colagem dos elementos de MLC:

1 – Adesivo Cascophen RS-216-M (resorcinol formaldeído), já conhecido no meio técnico, para todos os níveis de pressão de colagem testados (0,4 MPa a 1,5 MPa).

2 - Adesivo natural à base de Óxido de Magnésio e Proteína de Soja para os melhores níveis de pressão obtidos para o adesivo anterior Cascophen RS 216 – M. A proposta desse adesivo natural foi verificar a sua resposta no que se refere a qualidade de colagem para elementos de MLC uma vez que ele foi testado inicialmente para uso em painéis de madeira por Jang e Li (2015).

3 - Adesivo poliuretano bicomponente KDG 1909, produzido pela empresa KEHL® , para diferentes espessura de lamelas (1,5cm, 2,5cm e 3,5cm)

Os ensaios foram realizados com a utilização da máquina universal de ensaios EMIC com capacidade de 300 kN.

Para os ensaios realizados com adesivo Cascophen RS-216-M, foi testado *software* GLT *Rupture Analysis* na quantificação da porcentagem de ruptura na madeira em corpos de prova de MLC, de teste, confeccionados com madeiras de pinus e eucalipto, e colados com resina Cascophen RS 216-M. O *software* ImageJ, utilizado frequentemente em análises de microscopia, que necessita do escaneamento das superfícies rompidas dos corpos de prova, também foi utilizado na comparação dos resultados utilizando a resina RS 216-M conforme já citado.

Também foram realizadas análises complementares de microscopia para análise das regiões de colagem dos corpos de prova de cisalhamento. É importante salientar que os testes iniciais com a resina RS 216-M permitiram com facilidade a identificação da ruptura na madeira e no adesivo em função da utilização de um adesivo de cor escura após a cura, neste caso.

4.1 ANÁLISE DE DIFERENTES PRESSÕES DE COLAGEM

Foram produzidos elementos de MLC para verificação da resposta da porcentagem de delaminação e da resistência ao cisalhamento das linhas cola para diferentes pressões de colagem (0,4 MPa, 0,7MPa, 1,2 MPa e 1,5 MPa).

4.1.1 Produção dos elementos de mlc para diferentes pressões de colagem

A partir de tabuas com dimensões 6 cm x 16 cm x 300 cm foram obtidas lamelas menores com as dimensões 5 cm x 2 cm x 120 cm, correspondente a largura, espessura e comprimento, respectivamente. Para cada viga de MLC produzida para os ensaios foram utilizadas 5 lamelas, portanto, o elemento final colado apresentou as seguintes dimensões finais: 5 cm x 10 cm x 120 cm.

Além das lamelas menores, foram retirados das tábuas correspondentes (de cada lote de madeira) os corpos de prova de caracterização para os ensaios de resistência a compressão paralela, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, módulo de elasticidade na flexão, módulo de elasticidade na compressão e densidade aparente (Figura 17).

4.1.2 Classificação visual e mecânica para diferentes pressões de colagem

As lamelas foram submetidas ao processo de classificação visual e mecânica para escolha das peças de melhor qualidade. A caracterização visual, considerou itens como presença de nós e medula, encurvamento e arqueamento, torcimento e fissuras passantes e não passantes, conforme ABNT NBR 7190-6:2022. O módulo de elasticidade das lamelas na flexão foi obtido pelo ensaio de flexão de três pontos.

Figura 17 - Detalhes dos ensaios de caracterização mecânica das lamelas.



Compressão paralela às fibras



Cisalhamento paralelo às fibras

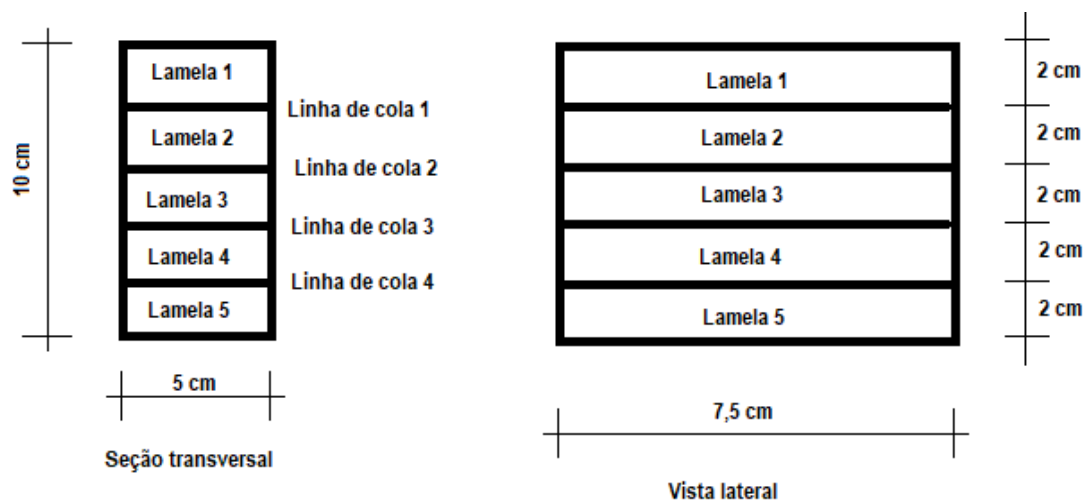


Flexão estática

Fonte: Autor.

Para a classificação visual das lamelas, segundo a Southern Pine Inspection Bureau – SPIB (1994) citada por Carreira e Dias (2005) foram consideradas as seguintes características: presença de nós e medula, encurvamento e arqueamento, torcimento, fissuras passantes e fissuras não passantes. Na composição das vigas coladas (elementos de MLC) as lamelas com maior módulo de elasticidade foram posicionadas nas extremidades do elemento de MLC e as lamelas com módulos inferiores foram posicionadas na parte central nas proximidades da linha neutra (LN). De cada uma das vigas foram retirados corpos de prova com comprimentos de 7,5 cm mantendo-se a mesma seção transversal da viga, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Configuração dos corpos de prova



Fonte: Autor.

4.1.3 Colagem e prensagem das vigas

Na produção dos corpos de prova, as vigas foram coladas inicialmente com o adesivo Cascophen bicomponente RS 216-M, com catalizador em pó. Este adesivo foi utilizado na proporção de 10:2 (adesivo:catalizador), ou seja, 12 g de adesivo para 2,4 g de catalizador. Na colagem das vigas considerou-se a gramatura de 240 g/m² para o adesivo, sendo o adesivo aplicado em duas faces da lamela, conforme os melhores resultados obtidos em testes preliminares.

Este adesivo exibe uma tonalidade escura após o processo de cura. Além disso, apresenta alta resistência (adesivo estrutural), e a intenção de sua utilização foi facilitar a visualização durante a quantificação da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo após os ensaios de cisalhamento das linhas de cola.

Foram utilizados diferentes níveis de pressão de colagem para as vigas de MLC (5 cm x 10 cm x 120 cm), sendo os níveis de pressão aplicados controlados por torque (torquímetro) determinado especificamente para cada nível de pressão, ou seja:

Para pressão de colagem de 0,4 MPa (torque de 16 N.m/parafuso da prensa), sendo vigas de eucalipto e 6 vigas de pinus ;

Para pressão de colagem de 0,7 MPa (torque de 28,0 N.m/parafuso da prensa), sendo 3 vigas de eucalipto e 6 vigas de pinus;

Para pressão de colagem de 1,2 MPa (torque de 48,0 N.m/parafuso da prensa), sendo 6 vigas de eucalipto e 6 vigas de pinus;

Para pressão de colagem de 1,5 MPa (torque de 60 N.m/parafuso da prensa);

Para promover a colagem dos elementos de MLC foi utilizada uma prensa industrial de chão, com aplicação de torque nas barras roscadas distribuídos no comprimento dos elementos de MLC (Figura 19). As vigas foram mantidas sob pressão por 72 horas, conforme instruções dos fabricantes do adesivo.

Figura 19 - Prensagem das lamelas



Fonte: Autor.

Após a prensagem, os elementos de MLC passaram pelo processo de padronização e regularização das superfícies na plaina desengrossadeira e serra circular para retirada das extremidades irregulares.

Para os ensaios de avaliação dos níveis de pressão de colagem utilizados, foram retirados um total de 16 corpos de prova de cada viga de MLC, com 7,5 cm de comprimento sendo excluídos os dois corpos de prova das extremidades das vigas de MLC.

A partir dos elementos de MLC produzidos para ambos os adesivos um total de 16 corpos de prova para verificação da pressão de colagem, sendo considerados 7 corpos de prova para os ensaios de delaminação, e pelo menos 4 corpos de prova para os ensaios de resistência ao cisalhamento das linhas de cola. Os corpos de prova, nestes casos, foram confeccionados com dimensões de 5 cm x 10 cm x 7,5 cm, conforme a proposta do método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022.

4.1.4 Ensaio de delaminação

O ensaio de delaminação foi realizado conforme o método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022 para ambiente externo, o qual tem como base a norma europeia EN 14080:2013. Para o ensaio foi utilizada uma autoclave cilíndrica (105 cm de comprimento, 48 cm de diâmetro e 1,1 cm de espessura de parede) produzida especificamente para este método de

ensaio. Acoplado à autoclave cilíndrica, encontra-se uma bomba de vácuo com manômetro de 75 kPa, um cilindro para controle de volume de água durante o processo de vácuo e um tambor para armazenamento da água. A aplicação de pressão é realizada através de um sistema externo de ar comprimido, com controle através de manômetro.

Para posterior verificação da porcentagem de delaminação em cada combinação espécie/adesivo, as linhas de cola das faces frontal e posterior, foram medidas antes do início do ensaio, utilizando-se um paquímetro digital com precisão de 0,01mm. Os corpos de prova tiveram também suas massas medidas antes dos processos de pressão e vácuo em autoclave. Os corpos de prova apresentavam umidade de $12\% \pm 1$ neste momento dos testes.

Os corpos de prova foram inseridos na autoclave, conforme Figura 20. Para garantir a submersão dos corpos de prova durante o ensaio, foi posicionada uma grade metálica sobre os mesmos, de maneira a limitar a movimentação. A tampa da autoclave foi devidamente fechada com as auxílio de uma chave de boca garantindo vedação completa e impedir a saída de água e ar e então iniciou-se o processo de ensaio de delaminação, através da inserção da água no interior da autoclave.

Figura 20 – Corpos de prova inseridos na autoclave para ensaio de delaminação.



Fonte: Autor.

Com os corpos de prova submersos por água dentro da autoclave, iniciou-se a aplicação de vácuo de 70kPa, com duração de 30 minutos. Encerrado o tempo, aplicou-se pressão entre 550 e 600 kPa, mantendo-se por 2 horas.

Ao final destes processos, os corpos de prova foram retirados da autoclave e submetidos ao processo de secagem em câmara climatizadora, em temperatura controlada, respeitando a faixa de 65 e 75°C e umidade relativa de 8% a 10%, com velocidade de ar circulante de 2m/s. Para efetiva circulação do ar, os corpos de prova foram posicionados com

distância de 5 cm entre si, com as seções transversais posicionadas paralelamente ao fluxo de ar. Os corpos de prova foram retirados da câmara climatizadora após atingirem a massa inicial obtida antes dos processos de pressão e vácuo, com variação máxima de 10% desse valor para cima.

Dentro do período de 1 hora, após finalizado o procedimento de secagem, com a utilização de um paquímetro digital, foi realizada a medição das juntas delaminadas nas duas faces da seção transversal.

Foram obtidos os resultados referentes aos percentuais de delaminação das linhas de cola conforme Equação (2) e comparados com os percentuais máximos recomendados pela norma.

4.1.5 Ensaio de cisalhamento na linha de cola

Foi realizado o ensaio de resistência ao cisalhamento conforme especificações da ABNT NBR 7190-6:2022, utilizando-se um dispositivo metálico acoplado a máquina universal de ensaios EMIC, com capacidade de 300kN (Figura 21). Esse dispositivo foi confeccionado exatamente para estes ensaios.

Vale mencionar que o comprimento 7,5 cm, neste caso, adotado para os corpos de prova teve o objetivo de permitir a ruptura dos corpos de prova utilizando-se a máquina EMIC, nas linhas de cola, sem danificar o equipamento metálico de ensaio confeccionado. Uma área maior a ser rompida, obtida por corpos de prova com comprimentos de 10 cm ao invés de 7,5 cm, por exemplo, solicitaria em maior nível de tensão o dispositivo de ensaio dificultando a obtenção da ruptura na linha de cola. O comprimento de 10 cm também é recomendado pela ABNT NBR 7190-6:2022, na composição dos corpos de prova de ensaio de cisalhamento das linhas de cola.

Figura 21 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Autor.

Após o rompimento das linhas de cola, foram verificadas as regiões de colagem e porcentagens de ruptura na madeira e no adesivo. Vale mencionar que a quantificação da porcentagem de ruptura é atualmente realizada no meio técnico de forma visual, gerando dados imprecisos. Diante disso, foi testado o *software* GLT *Rutpure Analysis* desenvolvido para esta finalidade, comparando-o com os resultados obtidos pelo *software* ImageJ que é um *software* tradicional para a análise de imagens a partir de escaneamento. Foram analisadas neste projeto um aproximadamente 500 superfícies rompidas através dos referidos *softwares*.

4.2 ANÁLISE DAS REGIÕES ROMPIDAS APÓS CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA

4.2.1 *Softwares* de análise de imagens

A ideia de associar a análise de imagens à avaliação das regiões rompidas dos corpos de prova de MLC após os ensaios de cisalhamento das linhas de cola se deve ao fato de que no método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022 é recomendado avaliar a porcentagem de ruptura na região de colagem. Nesse sentido, até o momento não existe uma recomendação normativa indicando como deve ser feita a quantificação da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo. A quantificação dessas porcentagens nos ensaios de qualidade de colagem que consideram normas estrangeiras tem sido feita de forma visual. Dentro deste contexto, e tendo-se em vista que esta análise das regiões de colagem não necessita de um grau de acurácia muito elevado, é importante considerar algum tipo de análise de imagens que possa orientar a

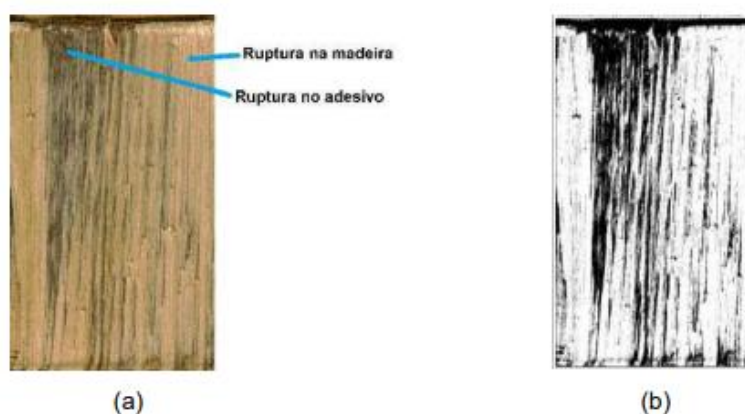
quantificação da ruptura no adesivo e na madeira após o ensaio de cisalhamento da linha de cola.

4.2.1.1 ImageJ

O *software* ImageJ é um *software* de domínio público, disponibilizado de maneira gratuita e é utilizado para processamento e análise de imagens. Ele permite a exibição, edição, análise, processamento, salvamento e impressão de imagens de 8, 16 e 32 bits e processa imagens de diversos formatos. O *software* atua através da intensidade ou nível de cinza dos pixels, medindo distâncias e ângulos, criando histogramas de densidade e realizando diversas manipulações de imagens (BOZZA, 2013). As imagens são obtidas através do escaneamento da superfície analisada.

O ImageJ, versão 1.52^a, é um *software* comercial amplamente utilizado na análise de imagens com o auxílio de scanner. Nesse trabalho, as superfícies rompidas após os ensaios de cisalhamento das linhas de cola foram escaneadas por meio de um scanner HP Scanjet G4050, em 256 cores, com resolução de 1200dpi, conforme ilustra a Figura 22. A quantificação da porcentagem de ruptura nas regiões de colagem de interesse para posterior comparação com os resultados fornecidos pelo ImageJ foi realizada com a utilização do recurso *threshold* das regiões de coloração de adesivo e madeira.

Figura 22 - Captura da imagem no *software* ImageJ: (a) Imagem digitalizada (scanner) (b) Imagem analisada pelo *software* ImageJ para quantificação da porcentagem.



Fonte: Autor.

4.2.1.2 GLT Rupture Analysis

O *software GLT Rupture Analysis*, foi desenvolvido pelo grupo de pesquisadores em MLC da UNESP de Itapeva. O *software* foi desenvolvido em linguagem Python. O objetivo do *software* foi de quantificar os percentuais de ruptura na madeira e no adesivo, nas regiões de colagem, após o ensaio de cisalhamento na linha de cola, conforme a norma ABNT NBR 7190-6:2022. Por isso, a nomenclatura utilizada para nomear o *software* está relacionada com o processo de análise em questão, ou seja, a sigla GLT significa *Glued Laminated Timber*.

Portanto, as funcionalidades fornecidas pelo *software* se apresentam como uma ferramenta importante para aperfeiçoamento das técnicas de análise da qualidade de colagem de MLC. A obtenção do percentual de ruptura através do *GLT Rupture Analysis*, tem resultados rápidos para grandes lotes de corpos de prova, além de gerar gráficos e dados estatísticos.

Para a realização da análise, são utilizadas imagens da superfície de colagem rompida, e através dos valores de pixels, é fornecido o mapeamento destas imagens. As informações são complementadas com a coloração do adesivo, para identificação do mesmo na região de colagem. Para utilizar essas funções, o *software* precisa do fornecimento de conjunto de imagens devidamente separadas por diferentes combinações de espécies/adesivos. Além disso, as imagens devem ser coletadas conforme o padrão dos seguintes itens:

- A distância entre a câmera e o corpo de prova deve ser de aproximadamente 10 cm e proporcionar a visualização completa da região da lamela rompida (Figura 22);
- A imagem deve ser capturada com fundo limpo, claro e com boa iluminação, evitando-se sombreamentos;
- Os arquivos de imagem devem estar no formato “.jpg”;
- As combinações de cada espécie-adesivo devem ser agrupadas em diferentes pastas.

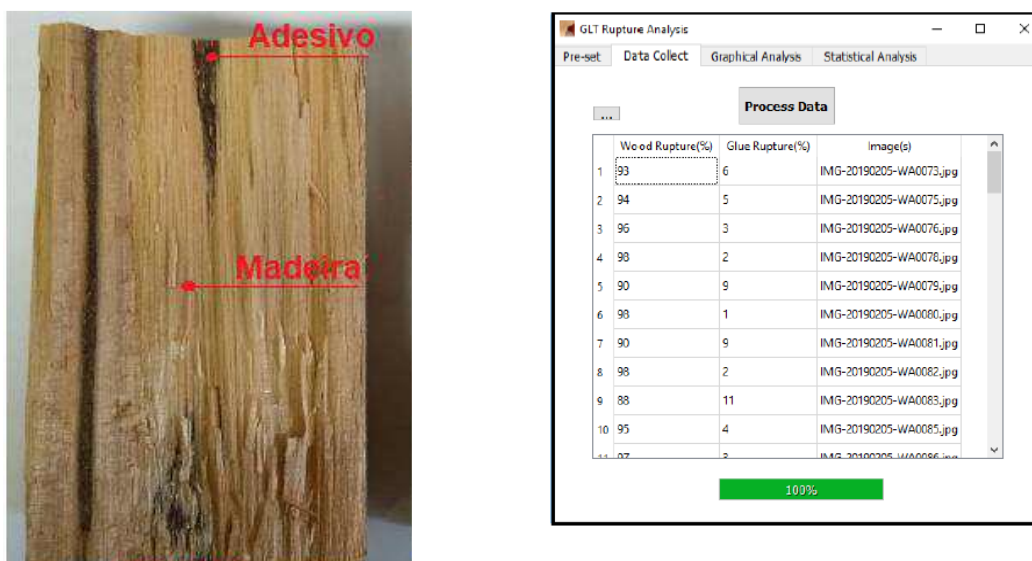
Figura 23 – Exemplo de imagem capturada referente à uma superfície de ruptura do corpo de prova rompido após o ensaio de cisalhamento da linha de cola.



Fonte: Autor.

A obtenção das imagens das regiões de colagem após o cisalhamento da linha de cola, deve seguir uma padronização, de maneira que a distância entre a câmera e o corpo de prova capture a região de ruptura por completo. Além disso, recomenda-se iluminação adequada, evitar sombras e fundo deve estar limpo e branco. A Figura 23 mostra uma imagem utilizada pelo *software GLT Rupture Analysis*, inserida no banco de dados do *software* após os ensaios de cisalhamento da linha de cola, que se refere a uma das faces analisadas do corpo de prova, como também a tela de resposta do *software* para várias áreas de colagem analisadas simultaneamente. A área escura (no caso a cor marrom do adesivo Cascophen RS 216-M) na Figura 23 corresponde à ruptura no adesivo e a região clara à ruptura na madeira. Para validação dos resultados obtidos pelo *software* GLT, foi realizada a comparação com resultados obtidos pelo *software* ImageJ, que é um *software* comercial utilizado para a análise de imagens, conforme detalhes no item seguinte.

Figura 24- Identificação dos padrões considerados na análise.



Fonte: Autor.

4.2.2 Análise microscópica

As análises de microscopia aplicadas a este estudo tiveram cinco principais finalidades:

- 1) Conhecer a qualidade da superfície das lamelas (abertura dos poros) logo após a lamela ter passado pelo desengrosso e retirada de pó da superfície com ar comprimido, uma vez que para a colagem das lamelas de madeira ser eficiente recomenda-se o desengrosso com até 24 horas antes da colagem;
- 2) Conhecer a espessura das linhas de cola das seções transversais dos corpos de prova de MLC para os principais valores das pressões de colagem aplicados nas combinações espécie/adesivo consideradas;
- 3) Avaliar se não houve esmagamento provocado pelas pressões de colagem utilizadas ao longo das linhas de cola da seção transversal os corpos de prova de MLC;
- 4) Avaliar a penetração do adesivo na madeira tendo-se em vista a anatomia da madeira considerada;
- 5) Complementar a avaliação das superfícies rompidas que foram analisadas pelos *softwares* de imagens (GLT e ImageJ) citados anteriormente.

Utilizou-se nas análises de microscopia, um microscópio ótico da marca LEICA M80, com iluminação, com faixa de *zoom* de 8:1, e *zoom* contínuo de 7,5x – 60x, disponível no Laboratório de Anatomia da Madeira da UNESP/Itapeva. O microscópio possui um sistema próprio de captação de imagens através do aplicativo computacional “Leica Qwin Standard”. Os detalhes do microscópio utilizado são apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Microscópio ótico LEICA M80 com iluminação.



Fonte: Autor.

As superfícies das lamelas das madeiras de pinus e de eucalipto, após usinadas na plaina desgrossadeira, e antes da colagem das vigas, passaram por análises de microscopia para a avaliação da qualidade destas superfícies para recebimento do adesivo Cascophen RS -216M.

Para tanto, duas lamelas de madeira (sendo uma de pinus e outra de eucalipto), logo após usinadas em plaina desgrossadeira, tiveram suas superfícies analisadas por microscopia ótica. De duas lamelas escolhidas aleatoriamente, com dimensões iniciais de 5 x 2 x 120 cm, antes da colagem vigas, foram retiradas duas amostras com dimensões 5 x 2 x 7,50 cm para a análise da qualidade de suas superfícies.

Posteriormente, para as combinações espécie/adesivo analisadas foram realizadas análises de microscopia ótica envolvendo as faces das lamelas para avaliação das espessuras das linhas de cola dos corpos de prova de cisalhamento, antes dos ensaios de resistência ao cisalhamento das linhas de cola.

4.3 ANÁLISE DO ADESIVO NATURAL (Proteína de Soja e Óxido de Magnésio)

4.3.1 Produção dos corpos de prova na avaliação do adesivo natural

Na produção dos elementos de MLC e respectivos corpos de prova para avaliação da qualidade de colagem utilizando o adesivo à base de Óxido de magnésio (MgO) + proteína de soja e água deionizada (Figura 26), foram avaliadas 3 proporções diferentes na produção do adesivo: 1:4:26 (MgO:proteína de soja:água), 1:5:26 (MgO:proteína de soja:água), 1:6:26 (MgO:proteína de soja:água). Estas quantidades foram consideradas, tendo-se em vista as quantidades utilizadas por Jang e Li (2015) na produção de painéis de compensado, sendo que a melhor proporção obtida pelo autor foi 1:6. No decorrer deste estudo, este adesivo será citado apenas como “adesivo natural”, para evitar repetições.

Figura 26 - (a) Mistura adesiva de composição natural (b) aplicação do adesivo natural nas lamelas de madeira



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Para a colagem das peças de madeira com adesivo natural foram considerados os melhores valores de pressão de colagem para os quais foram obtidos os melhores resultados para a qualidade de colagem na fase anterior quando da utilização do adesivo Cascophen RS 216 com madeiras de pinus e eucalipto. Somente os valores mais convenientes de pressão foram considerados tendo-se em vista que se tratava de ensaios preliminares para um adesivo natural

com comportamento de resposta da qualidade de colagem ainda desconhecido na colagem de elementos de MLC. A utilização de um adesivo natural que tenha uma resposta positiva quanto a resistência e que ao mesmo tempo colabore para a redução da toxidade para o meio ambiente e para as pessoas que trabalham com MLC é uma busca constante no meio técnico e científico.

Foi considerada para o adesivo natural a gramatura de 200 g/m², sendo que o adesivo também foi aplicado em duas faces da lamela. Para as lamelas de Pinus, foi utilizada a pressão de 0,7 MPa (torque de 28,0 N.m/parafuso da prensa) e para as lamelas de Eucalipto, foi utilizada a pressão de 1,2 MPa (torque de 48,0 N.m/parafuso da prensa).

A prensagem foi realizada em prensa industrial de chão (Figura 27), com aplicação de torque nas barras roscadas distribuídos no comprimento dos elementos de MLC. As vigas foram mantidas sob pressão por 72 horas.

Figura 27 - Prensagem dos elementos de MLC colados com adesivo natural (MgO e proteína de soja).



Fonte: Autor.

Após a prensagem, os elementos de MLC passaram pelo processo de padronização e regularização das superfícies na plaina desengrossadeira e serra circular para retirada das extremidades irregulares.

A partir dos elementos de MLC produzidos, foram retirados de 8 a 10 corpos de prova para delaminação e 5 corpos de prova para os ensaios de resistência ao cisalhamento das linhas

de cola, para cada proporção de adesivo. Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões de 5 cm x 10 cm x 7,5 cm.

4.3.2 Ensaios de delaminação e resistência ao cisalhamento na linha de cola na avaliação do adesivo natural

O ensaio de delaminação foi realizado conforme o método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022, nas mesmas condições de ensaio estabelecidas para a combinação espécie/adesivo anterior (Cascophen/Pinus e Cascophen/Eucalipto), constante no subcapítulo 4.1.4.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola foram realizados com a utilização da máquina universal de ensaios EMIC com capacidade de 300 kN, conforme especificações da ABNT NBR 7190-6:2022, mas mesmas condições especificadas para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola utilizada para a combinação espécie adesivo anterior (Cascophen/Pinus e Cascophen/Eucalipto), constante no subcapítulo 4.1.5.

4.4 ANÁLISE DA QUALIDADE DE COLAGEM PARA LAMELAS DE DIFERENTES ESPESSURAS

Foram produzidos elementos de MLC para verificação da resposta da resistência ao cisalhamento das linhas cola para diferentes espessuras de lamelas (1,5 cm, 2,5 cm e 3,5cm), para as madeiras de Pinus e Eucalipto.

4.4.1 Produção dos corpos de prova na avaliação da resistência de colagem para diferentes espessuras das lamelas

A partir das tabuas de Pinus e Eucalipto, foram obtidas lamelas com diferentes dimensões, sendo:

- 1 – Lamelas de 5 cm x 1,5 cm x 120 cm;
- 2 – Lamelas de 5 cm x 2,5 cm x 120 cm;
- 3 – Lamelas de 5 cm x 3,5 cm x 120 cm;

Além das lamelas de cada lote de madeira os corpos de prova de caracterização para os ensaios de resistência a compressão paralela, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, módulo de elasticidade na flexão, módulo de elasticidade na compressão e densidade aparente.

4.4.2 Prensagem e colagem das vigas com lamelas de diferentes espessuras

Para a produção dos corpos de prova, foi utilizado o adesivo poliuretano bicomponente (KDG 1909), produzido pela empresa KEHL, sendo composto por Polyol e isocianato. A cura total em temperatura ambiente (25°C) foi de 8 horas (KEHL, 2023). O adesivo foi aplicado com o uso de um pincel, na gramatura de 200g/m². Devido a coloração clara do adesivo KDG 1909, foi adicionado um pigmento na cor vermelha, para posterior identificação da porcentagem de ruptura na linha de cola após a colagem (Figura 28).

Figura 28 - Aplicação de adesivo Poliuretano com adição de corante para produção do MLC.



Fonte: Autor.

A colagem das lamelas foi realizada em prensa industrial de chão, sendo utilizada a pressão de 0,7 Mpa (torque de 28,0 N.m/parafuso da prensa) para as lamelas de Pinus e 1,2 MPa (torque de 48,0 N.m/parafuso da prensa) para as lamelas de Eucalipto. As vigas foram mantidas sob pressão pelo tempo mínimo de 8 horas.

Após o período de prensagem, as superfícies dos elementos de MLC foram regularizadas em plaina desengrossadeira e serra circular (Figura 29).

Figura 29 - Regularização da superfície da lamela.



Fonte: Autor.

A partir dos elementos de MLC produzidos, foram retirados corpos de prova para o ensaio de cisalhamento da linha de cola, com as dimensões variáveis, conforme as diferentes espessuras de lamelas (Figura 30).

Figura 30 - Corpos de prova para cisalhamento na linha de cola



Fonte: Autor.

4.4.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola para lamelas com diferentes espessuras

O ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola foi realizado conforme as recomendações da ABNT NBR 7190-6:2022, utilizando-se a máquina universal de ensaios EMIC (300kN) com dispositivo metálico próprio para o ensaio.

Assim como nos ensaios anteriores, a definição do comprimento 7,5cm para os corpos de prova foi objetivada por preservar o equipamento de metálico de ensaio (Figura 31).

Figura 31 - Ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola (lamelas de diferentes espessuras)



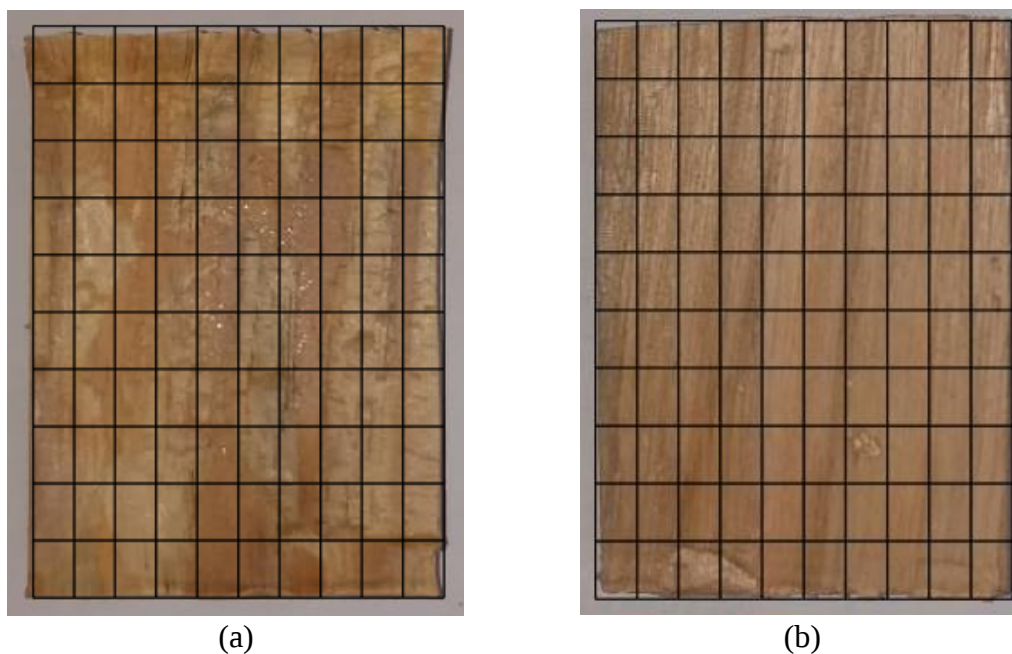
Fonte: Autor.

Após o rompimento das linhas de cola, as regiões de colagem foram verificadas, de maneira a quantificar a porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo. Devido a coloração clara do adesivo poliuretano, a análise da superfície de colagem foi realizada de forma visual.

O adesivo poliuretano bicomponente KDG 1909 possui uma coloração translúcida, o que dificulta a obtenção de dados precisos sobre a porcentagem de falha na madeira. Com o objetivo de facilitar a visualização e permitir o reconhecimento, adicionou-se um corante apropriado durante o processo de aplicação do adesivo (Figura 28). No entanto, após a cura, o adesivo apresentou uma coloração clara que dificultou o reconhecimento da porcentagem de falha na madeira.

A identificação da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo foi realizada de forma visual, com o auxílio de uma malha quadriculada contendo 100 elementos de divisão para contabilizar a proporção de adesivo/madeira. Utilizou-se um *software* de imagem para aplicar a malha quadriculada em uma das faces de cada uma das áreas de colagem analisadas, conforme a Figura 32.

Figura 32 – Malha quadriculada para quantificação de porcentagem de ruptura: (a) pinus (b) eucalipto



Fonte: Autor.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados experimentais foram analisados através da análise de variância de acordo com o teste Tukey. Foi admitido um nível de confiança de 95%. A normalidade e homogeneidade dos dados foram verificadas através dos testes de normalidade de Anderson-Darling com 5% de significância. As análises foram realizadas com o software Minitab 17.

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão apresentados neste capítulo e subdivididos na seguinte ordem: Avaliação da influência da pressão em elementos de MLC confeccionados com madeiras de pinus e eucalipto colados com adesivo Cascophen RS-216 M, resposta da qualidade de colagem para diferentes proporções de adesivo natural e influência da espessura das lamelas na qualidade de colagem de elementos de MLC confeccionados com madeiras de pinus e eucalipto colados com adesivo poliuretano KDG 1909.

Através dos ensaios de caracterização, foram obtidos os valores de módulo de elasticidade na flexão (E_M), módulo de elasticidade na compressão (E_{c0}) resistência à compressão paralela (f_{c0}), resistência ao cisalhamento (f_{v0}) e densidade aparente (ρ_{ap}).

Os resultados da caracterização das madeiras de eucalipto e pinus indicaram madeira de média resistência para ambas as espécies, sendo as madeiras de eucalipto com classe C30 e densidade média aparente média 605 kg/m^3 e madeiras de pinus com classe C20 e densidade aparente média igual a 471 kg/m^3 .

5.1 INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COLAGEM NA RESPOSTA DE DELAMINAÇÃO PARA MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO COM ADESIVO CASCOPHEN RS216-M

Para a determinação dos resultados de delaminação não foram consideradas as rupturas produzidas na madeira e foram ignoradas as delaminações isoladas menores que 2,5 mm de largura e situadas a mais de 5 mm da delaminação mais próxima, conforme recomendação da ABNT NBR 1790-6:2022. Os valores das porcentagens de delaminação foram utilizados para determinação dos valores médios apresentados nas Tabelas 3 e 4 referentes as madeiras de pinus e eucalipto coladas com adesivo Cascophen RS 216-M.

Os valores das porcentagens de delaminação total média (%) obtidas para as madeiras de Pinus coladas com adesivo Cascophen RS 216-M, conforme pressão aplicada para produção do elemento de MLC, estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Delaminação das vigas de Pinus coladas com adesivo Cascophen RS 216 em função das pressões utilizada na fabricação.

Pressão de colagem	Delaminação total média
--------------------	-------------------------

(MPa)	(%)
1,5	5,70
1,2	2,17
0,7	1,55
0,4	2,88

Fonte: Autor.

Os valores de delaminação total média (%) obtidos para a madeira de Eucalipto, conforme pressão aplicada para produção do elemento de MLC, estão presentes na Tabela 4.

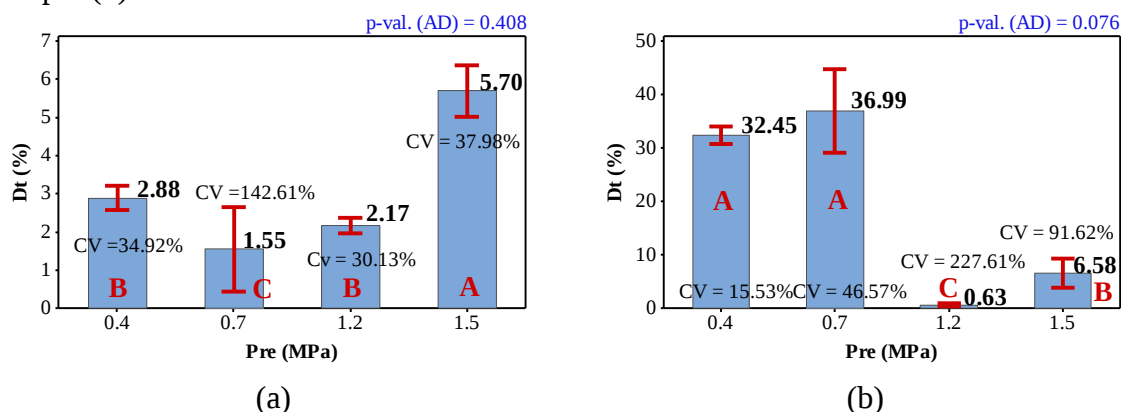
Tabela 4 – Delaminação das vigas de Eucalipto coladas com adesivo Cascophen RS 216 em função das pressões de colagem utilizada na fabricação.

Pressão de colagem (MPa)	Delaminação total média (%)
1,5	6,58
1,2	0,63
0,7	36,99
0,4	32,45

Fonte: Autor.

Nas Figuras 33a e 33b são apresentados os resultados [média, coeficiente de variação (CV), intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade), teste de Tukey, teste de normalidade de Anderson-Darling (p-val. (AD)) - 5% de significância] da delaminação (D_t) em função pressão (Pre) para as espécies de eucalipto e pinus, respectivamente.

Figura 33 - Resultados da influência da pressão (Pre) na D_t para as madeiras de pinus (a) e eucalipto (b).



* Letras distintas implicam em tratamentos com médias estatisticamente diferentes entre si (5% de significância).

Fonte: Autor.

O valor p (p -val.) do teste de Anderson-Darling foi superior ao nível de 5% de significância estipulado, o que valida os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (Figura 33).

A Figura 33a ilustra o gráfico de delaminação das vigas de Pinus versus pressão, sendo possível verificar que a pressão de 0,7 MPa apresentou menor valor de delaminação, ficando dentro do limite de 4% recomendado pelo método de ensaio brasileiro. Por outro lado, o valor de delaminação média obtida para a pressão de colagem de 1,5 MPa para o Pinus, apresentou maior porcentagem de delaminação (5,70 %). É possível observar que o aumento da pressão de 1,2 MPa para 1,5 MPa gerou aumento de delaminação nos corpos de prova de Pinus, ou seja, houve enfraquecimento da ligação entre adesivo e madeira. Altos valores de pressão podem gerar aumento de penetração do adesivo na madeira. Este fato pode ser justificado pois, de acordo com Bianche, Teixeira, Ladeira, Carneiro, Castro e Della Lucia (2017), a ocorrência de excesso de penetração do adesivo na madeira pode ocasionar a linha de cola “faminta”, ou seja, a camada de adesivo na linha de cola é insuficiente para promover a união entre as lamelas. Além disso, excesso de pressão também pode fazer com que o adesivo escorra pelas bordas do elemento de MLC, o que ocasiona redução da camada de adesivo.

A partir da Tabela 4 e Figura 33b pode-se observar que a menor porcentagem média de delaminação para o Eucalipto (0,63%) foi observada nas vigas de MLC coladas com pressão de 1,2 MPa, quando comparados às outras pressões de colagem utilizadas com valores 0,4 MPa, 0,7 MPa e 1,5 MPa. O valor da porcentagem de delaminação neste caso, ficou dentro do limite recomendado pela norma ABNT NBR 7190-6:2022 que é de 6% para ambientes externos no caso das folhosas.

Os resultados de delaminação para as pressões de colagem de 0,4 MPa e 0,7 MPa apresentaram valores estatisticamente equivalentes quando utilizadas as madeiras de Eucalipto, que apresentaram neste trabalho densidade superior a 500 kg/m^3 . Os resultados obtidos para estas pressões ficaram acima do limite recomendado pela norma, pois houve excesso de delaminação. Os valores de pressões 0,4 e 0,7 MPa mostraram-se insuficientes para promover a pressão necessária para a penetração do adesivo na madeira.

Os diferentes resultados obtidos para as duas espécies de madeira podem ser justificados pelas propriedades de cada madeira e, principalmente, pela sua densidade. A madeira de Pinus apresentou menor densidade, resultando em maior facilidade de penetração do adesivo devido a maior porosidade.

De acordo com Silva (2007), a porosidade da madeira está relacionada com a densidade, e ambas apresentam influência na penetração de adesivos. A porosidade é a

proporção de volume vazio e pode ser interpretada como o inverso da densidade, pois quanto maiores os níveis de densidade, menor a porosidade do material.

Essa relação justifica o fato de que madeiras mais densas demandam maior valor de pressão durante o processo produtivo de MLC. Porém, é importante usar a pressão adequada, pois pressões excessivas podem comprometer a qualidade da colagem, resultando em esmagamento da madeira por compressão ou a condição conhecida como “linha de cola faminta”. Dentro deste contexto, é importante adequar a pressão de colagem conforme a espécie e densidade da madeira, de forma a assegurar a colagem eficiente e garantir a resistência mecânica do elemento de MLC. Em caráter complementar, também foi avaliado se as pressões de colagem utilizadas não ultrapassaram os limites de resistência à compressão perpendicular (f_{c90}) das madeiras utilizadas na pesquisa. Para tanto, tomou-se inicialmente o valor médio da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), para as lamelas de eucalipto, que foi de 54 MPa. A relação entre as resistências de compressão paralela e normal às fibras, neste caso, foi dada pela Equação (4):

$$f_{c90} = 0,25 f_{c0} \quad (4)$$

O valor obtido para f_{c90} neste caso foi de 13,50 MPa contra apenas 1,2 MPa de pressão de colagem aplicada, ou seja, o valor da resistência à compressão normal da madeira foi bem superior ao valor da pressão de colagem utilizada para a madeira de eucalipto.

A Figura 34 mostra os corpos de prova com menor (esquerda) e maior (direita) porcentagem de delaminação da linha de cola, sendo, o corpo de prova (D2) da viga 2 (Pressão de 1,5 MPa) com 0,00% e o corpo de prova (D5) da viga 1 (Pressão de 0,7 MPa) com 71,40% - respectivamente.

Figura 34 - Resultados dos ensaios de delaminação para os ensaios com madeiras de eucalipto e adesivo Cascophen RS 216-M.



Fonte: Autor.

Assim como ocorreu para os elementos de MLC colados com madeiras de Eucalipto, o valor de resistência à compressão normal às fibras (f_{c90}), igual a 8,8 MPa, obtido para as madeiras de pinus, foi superior ao valor da pressão de colagem aplicada com valor de 0,7 MPa. Para as lamelas de Pinus, o valor médio da resistência à compressão paralela f_{c0m} considerado para a determinação de f_{c90} foi de 35,18 MPa.

5.1.1 Resistência média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)

Os valores de resistência ao cisalhamento foram utilizados para determinação dos valores médios apresentados das Tabelas 5 e 6.

Os valores de Resistência média ao cisalhamento da linha de cola (MPa) e respectivas porcentagens de ruptura na madeira, obtidos no *software* GLT *Rupture Analysis* para a combinação entre madeira de Eucalipto e adesivo Cascophen RS 216-M, conforme pressão de colagem, estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 – Média de resistência ao cisalhamento média das linhas de cola em função da pressão de colagem e quantificação da porcentagem de ruptura na madeira através do GLT para a combinação Eucáipto/Cascophen.

Pressão de colagem (MPa)	Resistencia média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)	Porcentagem de ruptura na madeira (%)
1,5	7,09	82,67
1,2	8,41	95,00
0,7	5,07	72,49
0,4	2,71	51,20

Fonte: Autor.

A maior porcentagem de ruptura na madeira, indica que o adesivo apresentou maior qualidade de colagem, ou seja, não existiu ruptura na linha de cola. Desta forma, foi possível verificar que a qualidade de colagem obtida com a pressão de 1,2 MPa foi relacionada com maior porcentagem de ruptura na madeira. A Figura 35 mostra o resultado do ensaio de cisalhamento da linha de cola para a amostra C5 da viga 1.

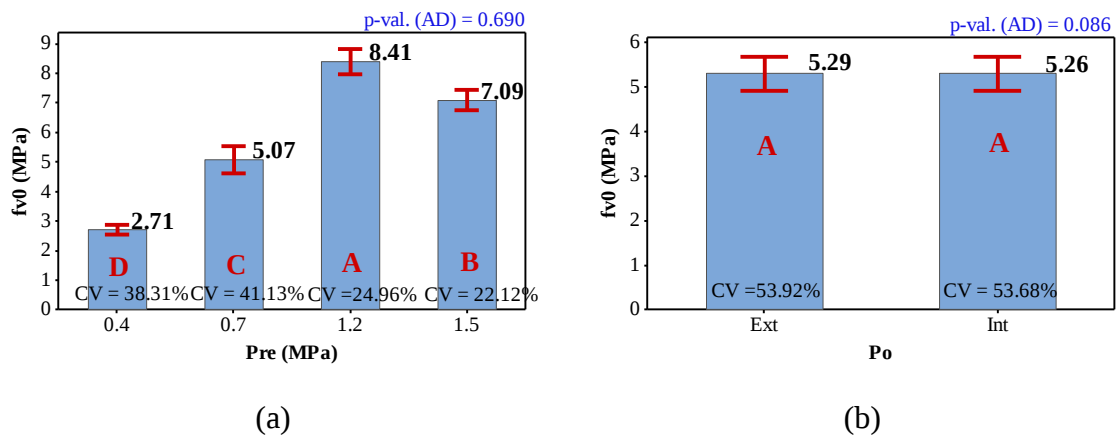
Figura 35 - Modo de ruptura mais comum na região colagem após abertura da amostra ensaiada com formão (amostra C5 (Pressão de colagem de 1,5 MPa) da viga 1 – linha de cola 4) – Eucalipto colado com adesivo Cascophen.



Fonte: Autor.

Na Figura 36a e 36b são apresentados os resultados [média, coeficiente de variação (CV), intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade), teste de Tukey, teste de normalidade de Anderson-Darling (p-val. (AD)) - 5% de significância] da resistência ao cisalhamento (f_{v0}) em função pressão de fabricação utilizada (Pre) e da posição das linhas de cola (Po) ao longo da altura da seção transversal para a espécie de eucalipto, e na Figura 37 são apresentados os resultados do gráfico de Pareto, sendo SE os efeitos padronizados.

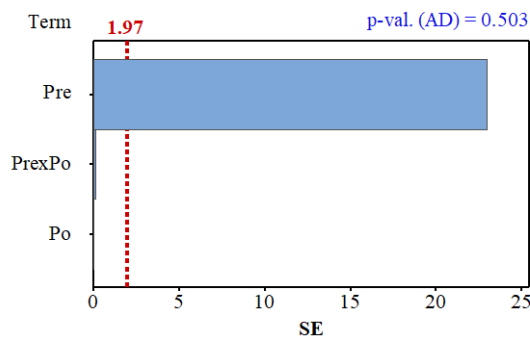
Figura 36 - Resultados da influência da pressão (Pre) (a) e da posição (Po) na f_{v0} para a madeiras de eucalipto.



* Letras distintas implicam em tratamentos com médias estatisticamente diferentes entre si (5% de significância).

Fonte: Autor.

Figura 37 - Gráfico de Pareto acerca dos efeitos isolados (Pre, Po) e do efeito de interação entre os fatores (Pre×Po) nos valores da f_{v0} para a madeira de eucalipto.



Fonte: Autor.

O valor p (p-val.) do teste de *Anderson-Darling* foi superior ao nível de 5% de significância estipulado, o que valida os resultados do teste de contraste de médias de Tukey e também os da análise de variância (ANOVA – 5% de significância) (Figuras 35 e 36). O maior valor médio de resistência ao cisalhamento das linhas de cola para a combinação Eucalipto/Cascophen (8,41 MPa) foi observado para os corpos de prova colados com pressão de 1,2 MPa, em concordância com o melhor valor obtido para delaminação. Os gráficos apresentados na Figura 36a, permitem a visualização do comportamento de resistência ao cisalhamento da linha de cola para madeira de Eucalipto conforme a variação da pressão, onde as pressões 0,4 MPa, 0,7MPa e 1,5MPa diferem entre si e apresentam resposta de resistência ao cisalhamento na linha de cola inferior àquela obtida para 1,2MPa. Os valores de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola não apresentaram diferenças significativas quando

relacionados com a posição das lamelas (externas ou internas) ao longo da altura da seção transversal do corpo de prova. Em outras palavras, os valores de resistência ao cisalhamento encontrados tanto nas lamelas externas quanto nas internas foram estatisticamente equivalentes. A Figura 37 demonstra que a pressão foi significativa no valor da f_{v0} , não havendo significância para o fator posição na f_{v0} . Os valores de resistência média ao cisalhamento da linha de cola (MPa) obtidos para a madeira de Pinus, conforme pressão de colagem, estão presentes na Tabela 6.

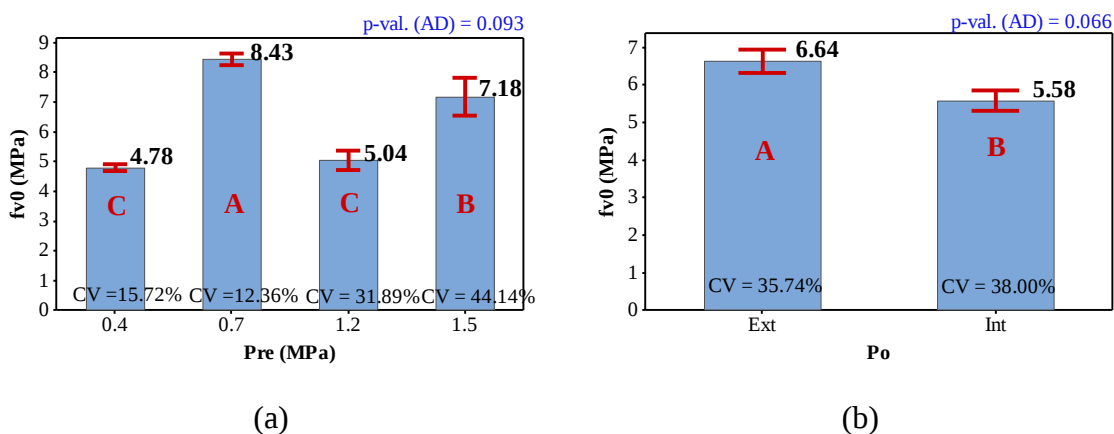
Tabela 6 - Resultado gráfico para as resistências ao cisalhamento das linhas de cola versus níveis de pressão aplicados, para a combinação pinus / adesivo Cascophen RS216-M.

Pressão de colagem (MPa)	Resistencia média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)	Porcentagem de ruptura na madeira (%)
1,5	7,18	74,04
1,2	5,04	80,20
0,7	8,43	93,75
0,4	4,78	63,84

Fonte: Autor.

Na Figura 38a e 38b são apresentados os resultados [média, coeficiente de variação (CV), intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade), teste de Tukey, teste de normalidade de Anderson-Darling (p-val. (AD)) - 5% de significância] da resistência ao cisalhamento (f_{v0}) em função pressão (Pre) e da posição (Po) para a espécie de pinus, e na Figura 39 são apresentados os resultados do gráfico de Pareto, sendo SE os efeitos padronizados.

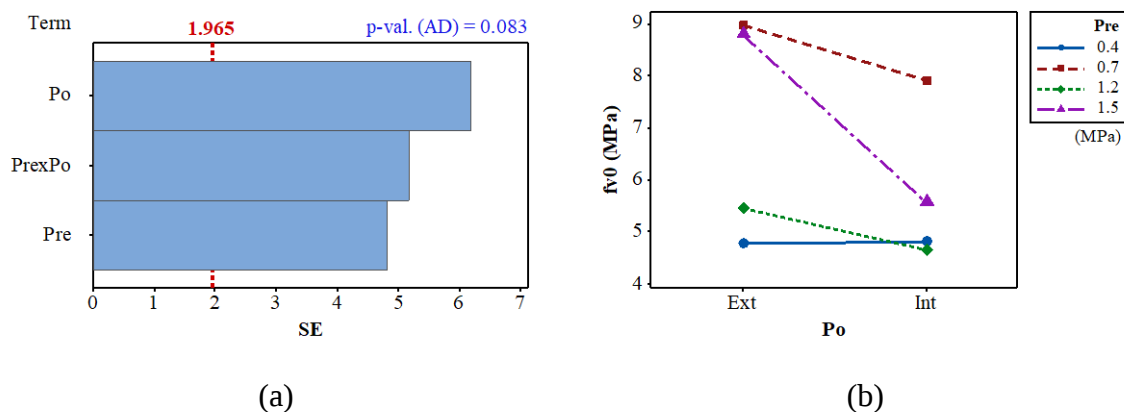
Figura 38 - Resultados da influência da pressão (Pre) (a) e da posição (Po) na f_{v0} para a madeiras de pinus.



* Letras distintas implicam em tratamentos com médias estatisticamente diferentes entre si (5% de significância).

Fonte: Autor.

Figura 39 - Gráfico de Pareto acerca dos efeitos isolados (Pre, Po) e do efeito de interação entre os fatores (Pre×Po) nos valores da f_{v0} (a) e gráfico de interação (b) para a madeira de pinus.



Fonte: Autor.

O valor p (p-val.) do teste de Anderson-Darling foi superior ao nível de 5% de significância estipulado, o que valida os resultados do teste de contraste de médias de Tukey e também os da ANOVA (Figuras 38 e 39).

O maior valor médio de resistência ao cisalhamento das linhas de cola para a combinação Pinus/Cascophen foi obtido pelos corpos de prova colados com pressão de 0,7 MPa, que apresentou diferença significativa quando comparado com os valores obtido para pressão de colagem de 0,4 MPa, 0,7 MPa e 1,5 MPa.

Os valores de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola para a combinação Pinus/Cascophen apresentaram diferenças significativa entre si, tanto para a pressão de colagem quanto para a posição da lamela. Além disso, a interação entre os dois fatores também foi considerada significativa pela ANOVA, o que não ocorreu para o eucalipto.

A classificação visual e mecânica e a distribuição das lamelas nos elementos de MLC permitiram que as lamelas fossem posicionadas em regiões de maior solicitação quando submetidas à flexão, conforme Figura 3. Neste sentido, as lamelas de melhor qualidade localizaram-se nas partes externas do elemento. A madeira de eucalipto, por apresentar menor número de defeitos naturais (como nó, medula, fenda, etc.) apresentou resultados mais homogêneos justificando a ausência de diferenças significativas para as camadas externas e internas dos elementos de MLC. Em contraste, o Pinus apresentou um número mais elevado de defeitos naturais (como a presença de nós), o que influenciou no posicionamento estratégico das maneiras de menor classificação na região da linha neutra (centro) do elemento de MLC, onde ocorre menor solicitação de resistência na flexão e maior resistência ao cisalhamento.

Na Figura 39 é possível observar que os valores de f_{v0} entre as posições para a pressão de 0,40 MPa diferiram pouco entre posições externa e interna. Porém, para a pressão de 1,2 MPa, observou-se uma redução da resistência f_{v0} externa para a interna, redução similar observada para a pressão de 0,70 MPa. A redução mais acentuada ocorreu para a pressão de 1,5 MPa. Evidencia-se que, para o pinus, o aumento da pressão de colagem (1,5 MPa) esteve associada aos valores reduzidos de resistência. Dessa forma, é justificável supor que a aplicação excessiva de pressão durante o a colagem pode ter gerado a diminuição da resistência das madeiras de menor qualidade, que foram estrategicamente posicionadas na linha neutra do elemento (camadas internas).

Os resultados obtidos confirmaram os valores recomendados na norma ABNT NBR 7190-1:2022, sendo de 0,7 MPa para madeiras de densidade inferior (para pinus, 0,5 g/cm³), e de 1,2 MPa para madeiras de densidade superior, ou seja, maior que 0,5 g/cm³ (eucalipto).

Assim como para as madeiras de Eucalipto, a porcentagem de ruptura na madeira, para Pinus/Cascophen, também foi proporcional à resistência ao cisalhamento na linha de cola.

A avaliação dos modos de ruptura nas regiões de colagem foi efetuada com o uso *software GLT Rupture Analysis* para a adesivo de coloração escura.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados médios das análises de imagens realizadas nos *softwares GLT Rupture Analysis* e no ImageJ para aproximadamente um total de 500 superfícies analisadas por cada *software*.

Tabela 7 - Comparação dos resultados médios de ruptura obtidos pelos *softwares* GLT e ImageJ.

Combinação madeira/adesivo	Ruptura (%)	
	IMAGEJ	GLT Rupture Analysis
	Adesivo	Adesivo
Eucalipto + Cascophen	5,00	4,67
Pinus + Cascophen	20,00	19,80

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos pelo *software GLT Rupture Analysis* ficaram muito próximos dos resultados obtidos pelo *software* ImageJ considerando o adesivo Cascophen RS 216-M com coloração escura após a cura e considerando ambas as espécies de madeira. As diferenças

encontradas foram de 0,35% e 0,25% superiores, respectivamente, para as madeiras de pinus e eucalipto, com relação ao *software* ImageJ.

5.1.2 Análise microscópica

5.1.2.1 Análise das superfícies das lamelas após o desengrosso em plaina e antes da colagem

Na Figura 40 são apresentadas as vistas macroscópicas (a olho nu) das lamelas de pinus e eucalipto 30 minutos antes do aplainamento em plaina desengrossadeira. O resultado da avaliação das lamelas de pinus e eucalipto por microscopia óptica são apresentados na Figura 41.

Figura 40 - Qualidade macroscópica das superfícies das lamelas usinadas e antes da colagem.



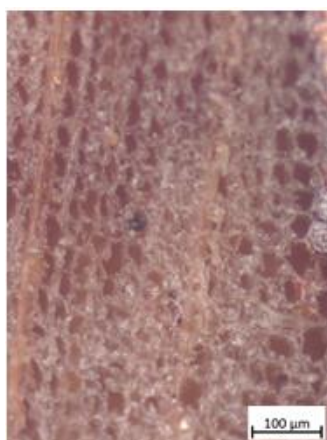
Pinus



Eucalipto

Fonte: Autor.

Figura 41 - Qualidade microscópica das superfícies das lamelas usinadas e antes da colagem.



Pinus



Eucalipto

Fonte: Autor.

Nas imagens ampliadas das superfícies (Figura 41), observou-se que a espécie de eucalipto apresentou alguns vasos abertos e com formatos irregulares (esses detalhes podem ser observados na Figura 43). Neste caso, existiu um indicativo de aumento de porosidade da superfície. Portanto, observou-se, que a porosidade depende também da anatomia da madeira, além do processo de usinagem, os quais podem interferir no acabamento da superfície. Foram também observados defeitos provocados pelo processo de usinagem, neste caso. No entanto, a presença de vasos abertos pode facilitar a penetração do adesivo na madeira.

Por outro lado, a madeira de pinus exibiu uma superfície mais homogênea, aparentemente com menor porosidade. Vale mencionar que no caso de madeiras de menor densidade (pinus), os tecidos são frágeis e as irregularidades causadas nas estruturas celulares, após o aplainamento, podem ter um efeito significativo para a baixa qualidade de acabamento superficial. A densidade da madeira deve ser considerada como um fator importante que influencia na capacidade do adesivo penetrar na madeira. Maior densidade pode implicar em maior dificuldade de colagem, como pode ser observado para as madeiras de eucalipto ($\rho_{ap} = 580 \text{ kg/m}^3$), que apresentaram densidade média aparente relativamente maior que as madeiras de pinus ($\rho_{ap} = 470 \text{ kg/m}^3$), nesta pesquisa. A melhor penetração do adesivo também se relaciona com melhor qualidade de abertura dos poros após desengrosso. Nesse sentido a afiação da ferramenta que faz o desengrosso é importante para manter a abertura dos poros.

5.1.2.2 Análise da face de uma das lamelas rompidas

A Figura 42 mostra os detalhes das rupturas mais comuns obtidas por microscopia (ampliação de 10 x) para as combinações espécie/adesivo analisadas.

Figura 42 – Qualidade microscópica da face das lamelas após o ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Eucalipto (C2 - V1)



Pinus (C4 - V1)

Fonte: Autor.

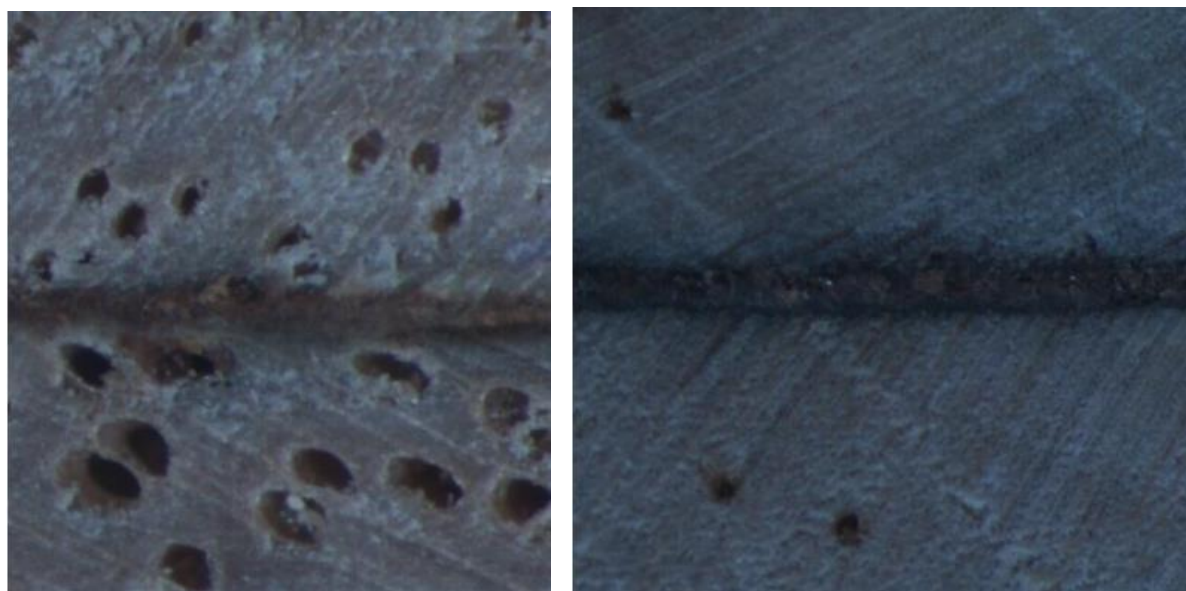
Para todas as combinações espécie/adesivo avaliadas, a predominância de ruptura nos ensaios de cisalhamento das linhas de cola ocorreu na madeira maciça, fora da área de interação adesivo/madeira, o que permite concluir que, de maneira geral, a resistência dessa região foi superior a resistência da madeira maciça.

Nas madeiras de eucalipto coladas com adesivo Cascophen RS 216-M a ruptura na madeira ocorreu através do arrancamento um volume de madeira na região de colagem, quando comparada com as madeiras de pinus coladas com o mesmo adesivo. A ruptura nas madeiras de pinus ocorreu em forma de lascamentos.

5.1.2.3 Resultados das imagens das linhas de cola

As linhas de cola das combinações espécie/adesivo analisadas por microscopia óptica neste trabalho são apresentadas na Figura 43. São apresentadas em cada figura duas lamelas de madeira unidas por uma linha adesiva na fase pura localizada na região central. Foram analisadas as linhas de cola correspondentes à primeira lamela, conforme indicado na Figura 18.

Figura 43 - Região das linhas de cola com adesivo Cascophen RS 216-M (Escala: 100 μm) analisadas por microscópio ótico (ampliação e 60 x).



Eucalipto (C4 – V3) – pressão 1,2 MPa

Pinus (C1 – V2) – pressão 0,7 MPa

Fonte: Autor.

As imagens de microscopia permitiram observar de forma clara a morfologia dos tecidos das madeiras e o adesivo. Para as madeiras de pinus, as colagens ocorreram a partir do contato de diferentes orientações de planos das lamelas de madeira (transversal e radial). As imagens

também permitiram observar que não existem evidências sobre esmagamento da madeira devido à pressão de colagem. Por outro lado, qualidade de colagem pode ter sido afetada pelos defeitos provocados pelo processo de usinagem e da anatomia da madeira.

A falta de foco e de resolução do método microscópico utilizado dificultou a interpretação mais precisa da penetração do adesivo, mas foi possível identificar o indicativo de preenchimento das estruturas celulares das madeiras com adesivo. Portanto, para avaliar a penetração do adesivo na madeira há necessidade de utilização de outras técnicas de microscopia.

Para o adesivo Cascophen RS 216-M não foi identificada a presença de bolhas e nem de cristais. Parte dos defeitos observados nas linhas adesivas foram provocados pela lâmina de serra utilizada no corte das seções transversais dos corpos de prova.

As variações das espessuras das linhas de cola para as combinações espécie/adesivo são apresentadas na Tabela 8.

Vale mencionar que os valores das espessuras das linhas de cola variaram em função da posição dos diferentes planos (radial e tangencial) de contato entre as lamelas coladas, como também em função do método de espalhamento do adesivo e da pressão de colagem (0,7 MPa ou 1,2 MPa) aplicada em cada viga. Pode-se afirmar também que as linhas adesivas, em sua fase pura, apresentaram espessuras diferentes ao longo da largura das imagens.

Tabela 8 - Variação das espessuras das linhas de cola dos corpos de prova analisados.

Adesivo	Espessuras (µm)	
	Eucalipto	Pinus
Cascophen RS 216 - M	87,6 - 211,8	95,8 – 319,0

Fonte: Autor.

5.2 MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO COM ADESIVO NATURAL

Nos itens seguintes estão apresentados os principais resultados obtidos para os testes de qualidade de colagem de elementos de MLC confeccionados com madeiras reflorestamento (pinus e eucalipto) e colados com adesivo natural, a partir dos níveis de pressão de colagem igual a 0,7 MPa para a colagem dos elementos com madeiras de pinus e de 1,2 MPa para a colagem dos elementos com madeiras de eucalipto.

5.2.1 Delaminação para adesivo natural

Os valores de porcentagens de delaminação foram utilizados para a determinação dos valores médios apresentados nas Tabelas 9 e 10, referentes às madeiras de pinus e eucalipto coladas com adesivo natural.

Os valores de delaminação total média (%) obtida para a madeira de Eucalipto e Pinus, conforme a proporção de colagem utilizada para produção do elemento de MLC, estão presentes nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Tabela 9 - Delaminação das vigas de Eucalipto coladas com adesivo natural em função da pressão utilizada na fabricação

Proporção de colagem	Porcentagem de delaminação (%)
6:1	63,70
5:1	54,13
4:1	74,03

Fonte: Autor.

Tabela 10 - Delaminação das vigas de Pinus coladas com adesivo natural em função da pressão utilizada na fabricação

Proporção de colagem	Porcentagem de delaminação (%)
6:1	55,18
5:1	74,52
4:1	75,81

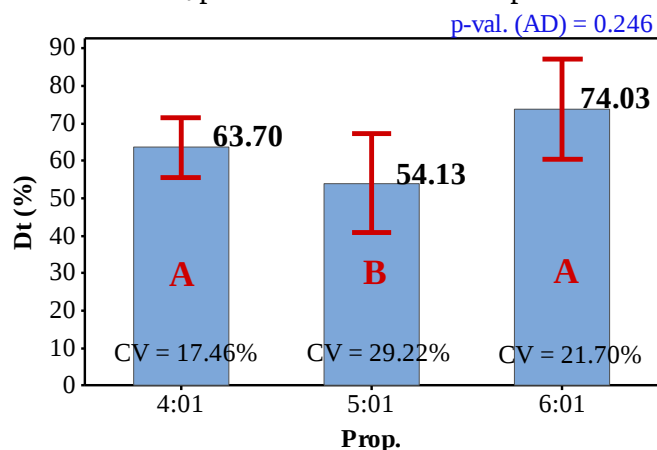
Fonte: Autor.

O método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022 estabelece os limites de delaminação conforme o ambiente de exposição e madeira utilizada (Tabela 2). Observou-se que o percentual de delaminação para ambas as combinações (Eucalipto/Adesivo MgO + Proteína de soja e pinus/adesivo MgO + Proteína de soja) ultrapassou os limites (4% para coníferas e de 6% para folhosas) estabelecidos pelo referido método de ensaio, para ambiente externo.

Nas Figuras 44 e 45 são apresentados os resultados [média, coeficiente de variação (CV), intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade), teste de Tukey, teste de normalidade de Anderson-Darling (p-val. (AD)) - 5% de significância] da porcentagem de delaminação (D_t)

em função das proporções (Prop.) de MgO e de proteína de soja investigadas para as espécies de eucalipto e pinus, respectivamente.

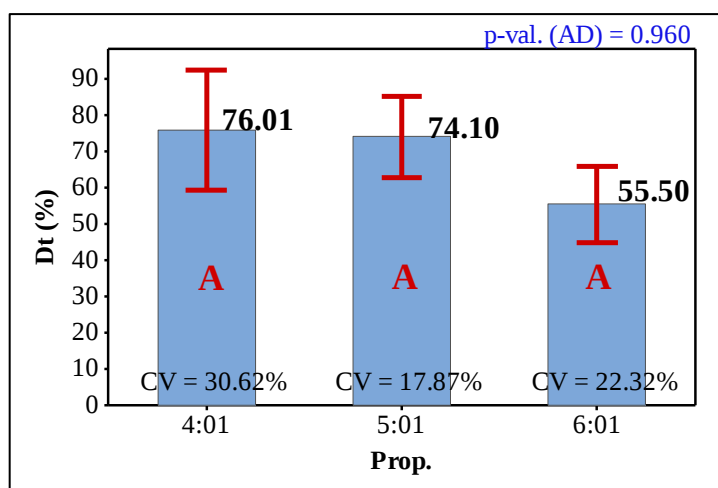
Figura 44 - Resultados da influência das proporções de MgO e de proteína de soja nos valores da D_t para a madeira de eucalipto.



* Letras distintas implicam em tratamentos com médias estatisticamente diferentes entre si (5% de significância).

Fonte: Autor.

Figura 45 - Resultados da influência das proporções de MgO e de proteína de soja nos valores da D_t para a madeira de pinus.



* Letras distintas implicam em tratamentos com médias estatisticamente diferentes entre si (5% de significância).

Fonte: Autor.

O valor p (p-val.) do teste de *Anderson-Darling* foi superior ao nível de 5% de significância estipulado, o que valida os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (Figuras 44 e 45). As proporções de MgO e de proteína de soja só não foram significativas nos valores da porcentagem de delaminação (D_t) para a madeira de pinus. Durante os ensaios de delaminação foi possível visualizar a baixa resistência à umidade para o adesivo natural.

Portanto, todos os corpos de prova de pinus submetidos ao ensaio de delaminação (D_t) observou-se resultados semelhante, havendo abertura das linhas de cola, independente da proporção de MgO e proteína de soja. Para as madeiras de eucalipto (Figura 45), as proporções 4:01 e 6:01 de MgO e de proteína de soja resultaram em valores médios da D_t estatisticamente equivalentes entre si, ambos superiores da porcentagem de delaminação da proporção 5:01.

5.2.2 Resistência média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)

Os valores de resistência ao cisalhamento foram utilizados para determinação dos valores médios apresentados das Tabelas 11 e 12.

Os valores de resistência média ao cisalhamento da linha de cola (MPa) para a combinação entre madeira de Eucalipto e adesivo natural, conforme proporção de colagem, estão presentes nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Resistência ao cisalhamento média das linhas de cola em função da proporção de colagem e para a combinação Eucalipto/MgO + Proteína de Soja.

Eucalipto	Resistencia média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)
Proporção 4:1	5,65
Proporção 5:1	5,72
Proporção 6:1	3,97

Fonte: Autor.

O maior valor médio de resistência ao cisalhamento das linhas de cola para a combinação Eucalipto/ MgO + Proteína de Soja (5,91MPa) foi observado para os corpos de prova colados com a proporção de colagem de 6:1 (Proteína de soja: MgO).

Tabela 12 - Resistência ao cisalhamento média das linhas de cola em função da proporção de colagem e para a combinação Pinus/MgO + Proteína de Soja.

Pinus	Resistencia média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)
Proporção 4:1	4,31
Proporção 5:1	6,07
Proporção 6:1	5,91

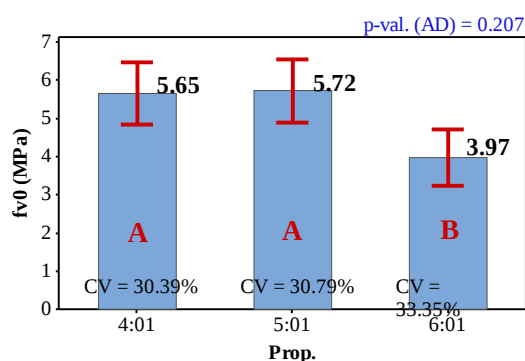
Fonte: Autor.

Os resultados para a madeira de pinus foram diferentes dos obtidos para o eucalipto. O maior valor médio de resistência ao cisalhamento das linhas de cola para a combinação Pinus/MgO + Proteína de Soja (6,07MPa) foi observado para os corpos de prova colados com a proporção de colagem de 5:1 (Proteína de soja: MgO).

De uma maneira geral, ambas as combinações espécies/adesivo testadas com o adesivo natural apresentaram valores de resistência ao cisalhamento da linha de cola superiores aos valores de resistência ao cisalhamento, 4,84 MPa para eucalipto e 3,47 MPa para pinus, obtidos na caracterização destas madeiras.

Nas Figuras 46 e 47 são apresentados os resultados [média, coeficiente de variação (CV), intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade), teste de Tukey, teste de normalidade de Anderson-Darling (p-val. (AD)) - 5% de significância] da porcentagem da resistência ao cisalhamento (f_{v0}) em função das proporções (Prop.) de MgO e de proteína de soja investigadas para as espécies de eucalipto e pinus, respectivamente.

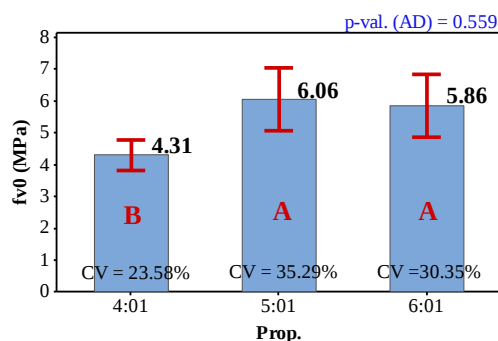
Figura 46 - Resultados da influência das proporções de MgO e de proteína de soja nos valores da f_{v0} para a madeira de eucalipto.



* Letras distintas implicam em tratamentos com médias estatisticamente diferentes entre si (5% de significância).

Fonte: Autor.

Figura 47 - Resultados da influência das proporções de MgO e de proteína de soja nos valores da fv_0 para a madeira de pinus



* Letras distintas implicam em tratamentos com médias estatisticamente diferentes entre si (5% de significância).
Fonte: Autor.

Para a madeira de Eucalipto, os valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola, foram inferiores para a proporção 6:01, uma vez que a madeira de eucalipto apresentou maior densidade que o pinus, o que pode dificultar a penetração do adesivo. Portanto, recomenda-se que sejam testadas novas proporções de adesivo para a madeira de Eucalipto tendo em vista ajustar adequadamente a viscosidade do adesivo natural. Vale mencionar que quanto maior a viscosidade maior é a resistência ao movimento e menor é a capacidade do adesivo escoar (fluir). Para a madeira de Pinus, as proporções 4:01 e 5:01 apresentaram valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola estatisticamente equivalentes e superiores à proporção 6:01.

A quantificação preliminar da ruptura na região de colagem de alguns corpos de prova, quando da utilização da resina natural, de coloração clara após a cura do adesivo, pelo uso do *software GLT Rupture Analysis*, não mostrou bons resultados visto que o *software* não diferenciou adequadamente a madeira e o adesivo, neste caso (Figura 48).

Figura 48 - Modo de ruptura mais comum na região colagem após abertura da amostra ensaiada com formão - Eucalipto colado com adesivo natural.



Fonte: Autor.

No entanto, os resultados obtidos para as porcentagens de delaminação, quando da utilização do adesivo natural não foram satisfatórios e superaram os limites de delaminação de 4% e de 6% estabelecidos segundo o método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022 para as madeiras de coníferas e dicotiledôneas, respectivamente. Com isso, observa-se a partir resultados obtidos na colagem das madeiras de reflorestamento (Pinus e Eucalipto) com o adesivo natural, que os elementos de MLC confeccionados podem ser utilizados em ambientes internos, uma vez que eles não resistiram a presença da umidade na madeira oriunda dos ciclos de pressão e vácuo em autoclave seguidos de secagem em estufa.

Vale mencionar que para melhorar a qualidade de colagem de painéis de madeira com o adesivo natural no quesito “porcentagem de delaminação” alguns autores como Jang e Li (2015) utilizam o parâmetro temperatura para a cura do adesivo. Nesse sentido, uma alternativa para tentar resolver esse problema, num primeiro momento, seria ampliar os estudos de colagem com esta resina natural a partir da utilização de prensa de alta frequência, tendo-se em vista a melhoria da resposta da qualidade de colagem em relação a delaminação. No entanto, este não foi o objetivo deste trabalho.

5.3 ELEMENTOS DE MLC COM LAMELAS DE DIFERENTES ESPESSURAS

5.3.1 Resistência média ao cisalhamento da linha de cola para lamelas de diferentes espessuras (MPa)

Os valores de resistência média ao cisalhamento da linha de cola (MPa) obtida para a madeira de Eucalipto e Pinus, conforme espessura da lamela para produção do elemento de MLC, estão presentes na Tabela 13 e 14, respectivamente.

Tabela 13- Resultado para as resistências ao cisalhamento das linhas de cola conforme linha de cola (Eucalipto).

Espessura das Lamelas	Resistencia média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)
1,5	7,33
2,5	8,09
3,5	10,00

Fonte: Autor.

Tabela 14 - Resultado para as resistências ao cisalhamento das linhas de cola conforme espessura das lamelas (Pinus).

Espessura das Lamelas	Resistencia média ao cisalhamento da linha de cola (MPa)
1,5	6,45
2,5	6,25
3,5	9,87

Fonte: Autor.

Os valores de porcentagem de ruptura na madeira (%) obtida para a madeira de Eucalipto e Pinus, conforme espessura da lamela para produção do elemento de MLC, estão presentes na Tabela 15 e 16, respectivamente.

Tabela 15 - Porcentagem de ruptura na madeira conforme espessura das lamelas (Pinus)

Espessura das Lamelas	Porcentagem de ruptura na madeira (%)	Desvio Padrão [CV (%)]
1,5	74,30	23,32 [31,39]
2,5	77,08	27,01 [35,04]
3,5	86,92	16,01 [18,42]

Fonte: Autor.

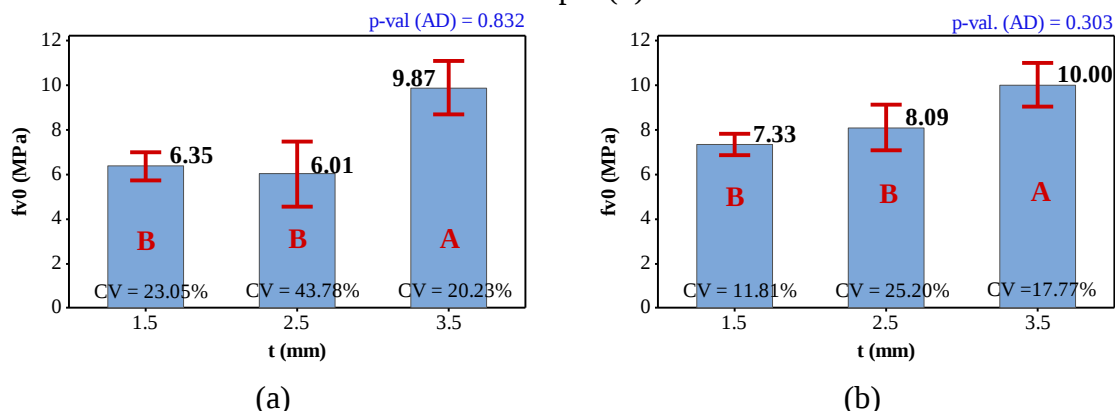
Tabela 16 - Porcentagem de ruptura na madeira conforme espessura das lamelas (Eucalipto)

Espessura das Lamelas	Porcentagem de ruptura na madeira (%)	Desvio Padrão [CV (%)]
1,5	100	0 [0]
2,5	100	0 [0]
3,5	100	0 [0]

Fonte: Autor.

Nas Figuras 49a e 49b são apresentados os resultados [média, coeficiente de variação (CV), intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade), teste de Tukey, teste de normalidade de Anderson-Darling (p-val. (AD)) - 5% de significância] da resistência ao cisalhamento (f_{v0}) em função da espessura (t) para as espécies de eucalipto e pinus, respectivamente.

Figura 49 - Resultados da influência da espessura (t) na f_{v0} para as madeiras de pinus (a) e eucalipto (b).



* Letras distintas implicam em tratamentos com médias estatisticamente diferentes entre si (5% de significância).
 Fonte: Autor.

O valor p (p-val.) do teste de Anderson-Darling foi superior ao nível de 5% de significância estipulado, o que valida os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (Figura 49).

Os resultados encontrados na literatura envolvendo a espessura da lamela foram para avaliar a resistência e rigidez do MLC na flexão. Não foram encontrados estudos que avaliam a qualidade de colagem em função da espessura da lamela.

Bohn (1995) realizou testes de flexão simples a 4 pontos, até a ruptura, utilizando madeiras de *Pinus Taeda* e *Elliottii* e adesivo resorcina-fenol-formol com variação da espessura da lamela (10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50 mm). Porém, o autor não encontrou diferença significativa nos resultados de resistência de ruptura e módulo de elasticidade. Icimoto, Calil Neto, Ferro, Macedo, Christoforo, Lahr e Calil Júnior (2016) investigaram, através do teste de flexão estática, a influência de diferentes espessuras de lamela (25 mm, 16,7 mm e 12,5 mm) de *Pinus oocarpa* (tratado com CCA) e coladas com resina Fenol Resorcinol. Os resultados não mostraram significância para valores do módulo de ruptura e de elasticidade em função da espessura das lamelas. Marquardt et. al. (2018) também realizou a análise da influência de diferentes espessuras de lamela (15 mm, 25 mm, 30 mm e 50 mm) na resistência à flexão de

vigas de MLC, porém, também não foram obtidas evidências estatísticas significativas de que as médias de resistência a carga de ruptura encontradas diferem entre si.

Por outro lado, o presente estudo verificou a influência da espessura da lamela de acordo com o método de ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola proposto pela recente norma ABNT NBR 719006:2022, mostrando influência da espessura da lamela na qualidade de colagem. Os melhores resultados para a resistência na linha de cola foram apresentados para os corpos de prova produzidos com lamelas de 3,5cm para ambas as espécies de madeira, neste caso, lamelas mais espessas. Estes resultados podem estar relacionados com maior volume para penetração de adesivo e menor possibilidade de ocorrer fragilização da madeira e da linha de cola devido à baixa espessura da lamela.

Para ambas as espécies de madeira, os valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola (f_{v0}) foram estatisticamente equivalentes para os corpos de prova produzidos com lamelas de espessuras de 1,5cm e 2,5 cm.

Foi possível constatar que durante os ensaios de cisalhamento na linha de cola, os corpos de prova de maior espessura permitiram melhor acomodação no dispositivo de ensaio no ponto de aplicação da carga, pois obtém maior área de apoio no momento da aplicação da carga, podendo resultar em valores melhores e mais precisos de resistência ao cisalhamento na linha de cola evitando ruptura por esmagamentos no topo do corpo de prova testado.

6 CONCLUSÕES

O método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022 baseado na norma europeia EN 14080:2013, mostrou-se eficiente no controle da qualidade de colagem dos elementos de MLC. A eficiência do método é referente ao limite de delaminação proposto compatível com a porcentagem de delaminação obtida nos ensaios, além de admitir um período curto para análise da qualidade de colagem, condizente com a realidade de exposição das estruturas de MLC nacionais.

A retirada do corpo de prova de ensaio do próprio elemento de MLC com 7,5 cm de comprimento facilita a confecção do corpo de prova e a realização dos ensaios de cisalhamento das linhas de cola e de delaminação com relativa facilidade.

O comprimento de 7,5 cm facilita a ruptura na região de colagem do corpo de prova, de maneira a garantir a ruptura da linha cola sem danificar o dispositivo de ensaio utilizado no ensaio de cisalhamento das linhas de cola.

O tempo de secagem dos corpos de prova em estufa após os ciclos de pressão e vácuo para todas as combinações espécie/adetivo deste trabalho variaram entre 19 h e 22 h. Essa é uma informação importante que pode orientar o início da secagem dos corpos de prova na estufa ou câmara climatizadora de modo que a massa dos corpos de prova não ultrapasse o limite entre 100% e 110% por atraso na tomada da pesagem.

Os resultados obtidos nos ensaios de delaminação e resistência ao cisalhamento das linhas de cola com madeiras de reflorestamento e adesivo RS 216-M revelaram que a densidade da madeira é um fator importante a ser considerado na colagem de MLC, assim como a pressão de colagem utilizada:

Madeiras com menor densidade (no caso desta pesquisa, o pinus com densidade $< 0,5 \text{ g/cm}^3$) apresentaram qualidade de colagem inferior quando da utilização de valores de pressão muito elevados e também muito baixos. Para o pinus, a melhor pressão de colagem (0,7 MPa) apresentou conformidade com o indicado pela norma ABNT NBR 7190-6:2022. As pressões de 1,2 MPa e 1,5 MPa, neste caso, resultaram em maior porcentagem de delaminação associada a menor resistência ao cisalhamento da linha de cola. Entretanto, a pressão de 0,4 MPa não foi suficiente para garantir a qualidade de colagem;

Por outro lado, para o eucalipto, com densidade superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$, os resultados foram diferentes dos obtidos para o pinus. A pressão de colagem de 0,7 MPa, assim como a pressão de 0,4 MPa, resultaram em menores valores de resistência ao cisalhamento da linha de cola e maiores porcentagens de delaminação, indicando menor qualidade de colagem. Os melhores

resultados de colagem foram obtidos para a pressão de 1,2 MPa, também em conformidade com a pressão indicada na norma ABNT NBR 7190-6:2022.

Os melhores resultados de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, obtidos para o adesivo natural a base de Óxido de Magnésio e proteína de soja foram observados quando da utilização da proporção de 4:1 e 5:1 (Proteína de Soja: MgO), para a madeira de eucalipto e proporção 5:1 e 6:1 para a madeira de pinus. Os valores de resistência da ligação colada, neste caso, foram superiores aos valores de resistência ao cisalhamento obtidos na caracterização das madeiras de pinus e eucalipto utilizadas na composição dos elementos de MLC. No entanto, mesmo com a obtenção de valores superiores de resistência ao cisalhamento na região de colagem o modo de ruptura predominante nesta região foi a ruptura no adesivo, sem arrancamento da madeira nesta região.

No que se refere a porcentagem limite de delaminação, o adesivo natural não apresentou bons resultados, pois foram obtidos valores superiores aos limites 4% e 6% recomendados pelo método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022 para coníferas e folhosas, respectivamente. Como o adesivo é a base de água sofre a influência da pressão gerada pela autoclave reagindo com a água presente no interior da autoclave.

O *software* GLT *Rupture Analysis* permitiu a quantificação das porcentagens de ruptura na madeira e no adesivo, com boa precisão, a partir da análise imagens, para o adesivo Cascophen RS 216 M, de coloração escura. Os resultados obtidos pelo *software* GLT *Rupture Analysis* apresentaram proximidade com os resultados obtidos pelo *software* ImageJ para as mesmas superfícies rompidas analisadas. No entanto, o *software* GLT apresentou maior rapidez e facilidade na quantificação das porcentagens de ruptura, uma vez que foi necessária somente a utilização de fotos obtidas para as regiões de colagem. No caso de utilização do ImageJ nem sempre a superfície rompida é paralela ao plano do scanner para captura da imagem, o que dificulta em alguns casos a captura da imagem da superfície rompida.

Para o adesivo natural e o adesivo poliuretano bicomponente KDG 1909, que apresentaram coloração clara após a cura, serão necessários outros artifícios para melhorar a visualização da superfície pelo *software*, como o tingimento das superfícies rompidas com iodo, ou então a utilização de corante adequado junto ao adesivo.

As análises de microscopia foram capazes de apontar que existiram diferenças nas qualidades das superfícies usinadas das lamelas de madeiras de pinus e eucalipto. Também foram capazes de quantificar as variações das espessuras das linhas de cola das seções transversais dos corpos de prova de MLC sendo a variação de 87,6 - 211,8 μm para os corpos de prova de eucalipto e de 95,8-319,0 μm para os corpos de prova de pinus.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola para lamelas de diferentes espessuras não apresentaram diferença significativa para as espessuras de 1,5 cm e 2,5 cm. No entanto, obtiveram resultados estatisticamente superiores para as lamelas de 3,5 cm, para ambas as espécies. Isso indica que lamelas com maiores espessuras podem apresentar melhores propriedades de qualidade de colagem.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para possíveis melhorias no resultado de colagem com o adesivo natural a base de proteína de soja e MgO, recomenda-se o uso de prensa de alta frequência na colagem de compósitos de madeira.

Sugere-se que sejam realizados estudos com variação da gramatura do adesivo associada a variação da pressão e espessura das lamelas.

Quando da utilização de adesivos com coloração clara após a cura, como o adesivo natural testado nesta pesquisa, e como a maioria dos adesivos poliuretanos, utilizar iodo para tingimento da superfície do corpo do corpo de prova rompido após o ensaio de cisalhamento da linha de cola ou então corante junto ao adesivo antes da colagem para permitir melhor visualização da área rompida pelos *softwares* de imagens.

Recomenda-se o estudo numérico do espraçamento das cargas durante a aplicação da pressão de fabricação das vigas de MLC.

Recomenda-se também a avaliação numérica das regiões de colagem dos corpos de prova para avaliação da distribuição das tensões para posterior confirmação dos modos de ruptura.

REFERÊNCIAS

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 INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC T110**: Cyclic Delamination Test. Portland: AITC, 2007.

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

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, PA: ASTM, 2004.

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

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

ANDRADE, V. E. de. **Delaminação e resistência da linha de linha de cola em elementos de MLC segundo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:2013**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Instituto de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2019.

APRILANTI, M. D. **Influência de um corte na borda tracionada de uma viga maciça simulando uma emenda de topo na lâmina inferior de vigas laminadas coladas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

ARAUJO, 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, v. 9, n. 1, p. 79-88, abr. 2017.

ARAUJO, D. R. **Avaliação do efeito da umidade da madeira na resistência ao cisalhamento da linha de cola**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Instituto de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2015.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-3**: estruturas de madeira – 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 (ABNT). **NBR 7190-6**: estruturas de madeira – métodos de ensaio para madeira lamelada colada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BALDUCCI, F. *et. al.* A formaldehyde-free adhesive for particleboards based on soy flour, magnesium oxide, and a plant-derived enzymatic hydrolysate. **Bioresources**, Raleigh, v. 15, n. 2, p. 3087-3102, 18 mar. 2020.

BIANCHE, J. J. *et. al.* Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 24, p. 1-9, 3 ago. 2017.

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. (Mestrado em Programa em Engenharia Mecânica - Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

BOHN, A. R. **Influência da espessura das lâminas e da cola na madeira laminada colada.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil). 1995. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, 1995.

BOZZA, P. C. **Elaboração de um guia de utilização de 10 ferramentas do software ImageJ em imagens digitais.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Curso Superior de Tecnologia Radiologia) Departamento Acadêmico de Física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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**, Leiden, v. 21, n.3/4, p. 319- 330, 2007.

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

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0112.10**: Evaluation of adhesives for structural wood products (limited moisture exposure). Mississauga: CSA, 2007.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0112.9**: Evaluation of adhesives for structural wood products (exterior exposure). Mississauga: CSA, 2004.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0177**: Qualification code for manufactures of structural glued-laminated timber. Mississauga: CSA, 2006.

CARNEIRO, R. P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

CARPINTERIA. Portfólio. [2022] Disponível em: <https://carpinteria.com.br/>. Acesso em: 28 de jan. de 2022.

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

CELESTINO, V. R. de B. **Estudo do comportamento físico e mecânico de painéis aglomerados fabricados com partículas de Tectona grandis e Corymbia citriodora**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2020.

DEPIERI, R.; SANTOS, A. C. E.; DA COSTA, O. A. L. O uso sustentável do pinus elliottii para a fabricação do MLC – madeira laminada colada. **FOCO: caderno de estudos e pesquisas**, 2020, n. 15, p. 23-38, 2020.

DUARTE, R. S.; SILVA, S. R.; CARRASCO, E.V. M. Utilização de ensaios não-destrutivos na fabricação de peças de MLC visando a otimização de seu desempenho. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9, 2004, Cuiabá. **Proceedings** [...]. Cuiabá: IX EBRAMEM, 2004. p. 25-37.

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

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 386**: Glued Laminated Timber: performance requirements and minimum production requirements. Brussels: CEN, 2001.

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

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

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FREITAS, G.; MAZZARDO, S. C. Uso de madeira laminada colada (MLC) em atividades de construção civil: histórico e potencialidades. *In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E SEMINÁRIO INTEGRADO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO*, 2021. **Anais [...]**. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/siepe/issue/view/466>. Acesso em: 10 fev. 2023.

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 Programa em Engenharia Mecânica - Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

GROTTO, A. C.; HEMKEMEIER, M.; ROSSATO, M. V. Sustainability in the use of polyurethane and reuse of shavings. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 11, 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, v. 6, n. 2, p. 51-55, 1 abr. 2016.

ITA CONSTRUTORA. **Madeira laminada colada**. [2023]. Disponível em: <https://www.itaconstrutora.com.br/>. Acesso em: 05 abr. 2023.

JANG, Y.; LI, K. An all-natural adhesive for bonding wood. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 92, n. 3, p. 431-438, 2015.

JESUS, J. M. H. de. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

KEHL. **KDG1909 INFORMAÇÕES TÉCNICAS**. São Carlos: Kehl, 2023.

LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M.; VALLE, I. M. R. O uso da madeira laminada colada no Brasil: panorama e desafios. *In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 2., 2017, Buenos Aires. **Conference Paper [...]**. Buenos Aires: Unnoba, 2017. p. 1-12. Disponível em: <https://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T7-20.%20O%20USO%20DA%20MADEIRA%20LAMINADA%20COLADA%20NO%20BRASIL.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2022.

LIMA, K. P. L. *et al.* Colagem da madeira de clones de Eucalyptus com três adesivos comerciais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 73-77, 2008.

LISBOA, F. D. **Análise da qualidade de colagem de corpos de prova de madeira lamelada colada com adesivo poliuretano monocomponente**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Instituto de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2020.

MARQUARDT, L. *et. al.* Análise da resistência à flexão de vigas de madeira laminada colada com diferentes espessuras de lâminas. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil**, Universidade do Extremo Sul Catarinense, v. 1, n. 2, 2018.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto**: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro. 2009. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

NASCIMENTO, A. M. *et al.* Comportamento de ligações adesivas em madeiras de reflorestamento. **Floresta e Ambiente**, v. 9, p. 54-62, 2012.

NOGUEIRA, D. A versatilidade da madeira laminada colada. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 8, p.01-14, jul. 2017.

PAULI, B. A.; AZAMBUJA, M. dos A.; OLIVEIRA NETO, L. de . Madeira lamelada colada: Potencial em edificação, da graduação à industrialização. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, Tupã, v. 9, n. 24, 2021.

PEREIRA, P. I. F. **Avaliação de vigas de madeira de Castanho tendo por base a classificação visual e ensaios não destrutivos**. 2015. Dissertação (Mestrado Internacional em Sustentabilidade do Ambiente Construído). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2015.

PIZZI, A. **Wood adhesives**: Chemistry and Technology, 1. ed. New York: CRC Press, 1983.

RITTER, M.A. **Timber bridges**: Design, construction, inspection, and maintenance. Washington, DC: Forest Service, 1990.

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

SEGUNDINHO, P. G. de A. *et al.* Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p.533-540, set. 2015.

PARRA SERRANO, L. J. **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.

SILVA, M. R. da. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU. **Standard grading rules for Southern Pine lumber**. Pensacola, 1994.

VICK, C. B. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: USDA Forest Service, 1999.

XU, Y. *et al.* Research Progress of Soybean Protein Adhesive: a review. **Journal Of Renewable Materials**, v. 10, n. 10, p. 2519-2541, 2021.