



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva

KETHELYN KEROLAYNE SILVEIRA PINTO

**Análise da qualidade de colagem de elementos de MLC, utilizando os
*softwares ImageJ e GLT Rupture Analysis***

Itapeva – SP
2023

KETHELYN KEROLAYNE SILVEIRA PINTO

**Análise da qualidade de colagem de elementos de MLC, utilizando os
softwares *ImageJ* e *GLT Rupture Analysis***

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao Conselho de Curso de
Engenharia Industrial – Madeira da
Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Ciências e Engenharia,
Câmpus de Itapeva, como parte dos
requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Industrial –
Madeira.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge
Duarte de Souza

Itapeva - SP
2023

P659a Pinto, Kethelyn Kerolayne Silveira

 Análise da qualidade de colagem de elementos de MLC, utilizando os softwares ImageJ e GLT Rupture Analysis / Kethelyn Kerolayne Silveira Pinto. -- Itapeva, 2023

 50 f.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva

 Orientador: Alexandre Jorge Duarte de Souza

 1. Madeira Lamelada Colada. 2. Porcentagem de ruptura na madeira. 3. Qualidade de colagem. 4. Resistência nas linhas de cola. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

KETHELYN KEROLAYNE SILVEIRA PINTO

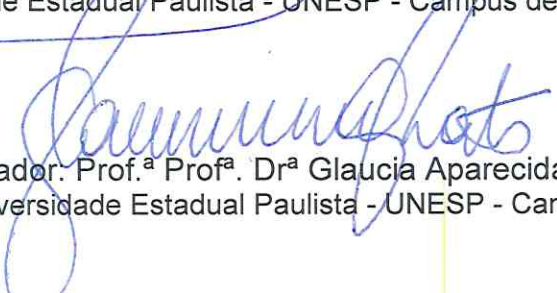
**ANÁLISE DA QUALIDADE DE COLAGEM DE ELEMENTOS DE MLC,
UTILIZANDO OS SOFTWARES IMAGEJ E GLT RUPTURE ANALYSIS**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial - Madeira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA


Orientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.


2º Examinador: Prof. Dr. Antonio Francisco Savi
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.


3º Examinador: Prof.^a Prof.^a Dr.^a Glaucia Aparecida Prates
Pesquisadora - Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 30/10/2023.

Aos meus pais pela compreensão, carinho
e apoio incansável.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que desempenharam um papel fundamental na realização deste trabalho e ao longo da minha jornada acadêmica.

Primeiramente, à minha mãe, que sempre foi minha maior apoiadora. Seu amor incondicional, paciência infinita e encorajamento constante foram meu alicerce ao longo desses anos.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza, agradeço por sua orientação e sabedoria ao longo deste processo. Suas orientações, paciência e incentivo foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Não posso deixar de expressar minha gratidão a todos os outros professores que tive o privilégio de aprender ao longo dos cinco anos de minha graduação. Cada um de vocês contribuiu para minha formação de maneira única, expandindo meu horizonte de conhecimento e influenciando positivamente a pessoa que sou hoje.

Aos meus queridos colegas, Maria, Camilla, Caio e Carlos, gostaria de agradecer pelo companheirismo, amizade e apoio que compartilhamos durante toda a graduação.

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

RESUMO

A madeira como material de construção apresenta propriedades e características que a tornam atraente quando comparada aos outros materiais. Dentre os produtos derivados da madeira, pode-se destacar a madeira lamelada colada (MLC), que consiste na união de lamelas dispostas com as fibras paralelas entre si por meio de um adesivo sintético. A Madeira Lamelada Colada é altamente recomendada para o uso em estruturas e edificações devido as suas propriedades mecânicas e a variedade de aplicações e formatos comparada com a madeira maciça. O controle de qualidade é de grande importância para garantir o bom comportamento estrutural do material e este é realizado por meio dos ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola. Após os ensaios de cisalhamento é essencial a quantificação dos modos de ruptura (na madeira ou no adesivo) na região de colagem, sendo que uma colagem satisfatória é obtida quando a maior porcentagem de ruptura ocorre na madeira. A quantificação da porcentagem de ruptura na região de colagem, é obtida atualmente, no meio técnico, de forma visual, fazendo com que os resultados estejam sujeitos a imprecisões e subjetividade. O objetivo desse trabalho foi a análise da qualidade de colagem de elementos de MLC de pinus e a quantificação da porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo através de três métodos: visualmente, *softwares ImageJ* e *GLT Rupture Analysis*, com posterior comparação dos resultados obtidos. Todos os métodos analisados nesta pesquisa foram capazes de quantificar a porcentagem de ruptura na região de colagem e foi constatado que diferem estatisticamente. Numericamente, observou-se que a porcentagem média obtida para a ruptura no adesivo a partir do *software* GLT foi em torno de 7% maior que no *software* profissional *ImageJ* e na malha quadriculada. Devido à praticidade de uso do GLT e análise simultânea dos dados, este acaba sendo mais vantajoso.

Palavras-chave: madeira lamelada colada; porcentagem de ruptura na madeira; qualidade de colagem; resistência nas linhas de cola; quantificação de defeitos.

ABSTRACT

Wood as a construction material has properties and characteristics that make it attractive when compared to other materials. Among the products derived from wood, we can highlight glued laminated timber (GLT), which consists of joining lamellas arranged with the fibers parallel to each other using a synthetic adhesive. Glued Laminated Timber is highly recommended for use in structures and buildings due to its mechanical properties and the variety of applications and formats compared to solid wood. Quality control is of great importance to guarantee the good structural behavior of the material and this is carried out through delamination and shear resistance tests on the glue lines. After the shear tests, it is essential to quantify the rupture modes (in the wood or in the adhesive) in the bonding region, and a satisfactory bond is obtained when the highest percentage of rupture occurs in the wood. The quantification of the percentage of rupture in the bonding region is currently obtained, in technical circles, visually, making the results subject to inaccuracies and subjectivity. The objective of this work was to analyze the bonding quality of pine GLT elements and quantify the percentage of rupture in wood and adhesive using three methods: visually, ImageJ and GLT Rupture Analysis software, with subsequent comparison of the results obtained. All methods analyzed in this research were able to quantify the percentage of rupture in the bonding region and were found to differ statistically. Numerically, it was observed that the average percentage obtained for adhesive rupture using the GLT software was around 7% higher than that obtained using the professional ImageJ software and the checkered mesh. Due to the practicality of using GLT and simultaneous data analysis, it ends up being more advantageous.

Keywords: glued laminated timber; percentage of rupture in wood; gluing quality; resistance in glue lines; quantification of defects.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de uma viga estrutural de MLC	17
Figura 2 - Média geral da resistência à flexão estática e compressão paralela às fibras, respectivamente	20
Figura 3 - Dimensões em cm dos corpos de prova: (a) compressão; (b) cisalhamento; (c) densidade e umidade	24
Figura 4 - Ensaio: (a) Compressão paralela as fibras; (b) Cisalhamento	25
Figura 5 - Ensaio de flexão estática não destrutivo - sonelastic.....	26
Figura 6 - Detalhe da confecção das vigas de MLC: (a) Colagem das lamelas; (b) seção transversal das vigas e numeração das lamelas e linhas de cola	27
Figura 7 - Colagem das vigas de MLC na prensa de chão	28
Figura 8 - Retirada dos corpos de prova de teste das vigas de MLC.....	28
Figura 9 - Ensaio de cisalhamento na linha de cola segundo ABNT NBR 17024 (2021)	29
Figura 10 - Análise da região de colagem após ensaio de cisalhamento na linha de cola.....	30
Figura 11 - Resultados de imagens no software ImageJ.	30
Figura 12 - Resultados das imagens no software GLT Rupture Analysis	31
Figura 13 - Teste de normalidade dos dados obtidos através da malha quadriculada	34
Figura 14 - Teste de normalidade dos dados obtidos no software <i>ImageJ</i>	35
Figura 15 - Teste de normalidade dos dados obtidos no programa <i>GLT Rupture Analysis</i>	35
Figura 16 - Diagrama de caixa das porcentagens de ruptura obtidas pelos três métodos	36
Figura 17 - Histograma dos resultados obtidos pelos três métodos: (A) Comparação dos resultados obtidos pela malha com o <i>software</i> GLT; (B) Comparação dos resultados obtidos pela malha com o <i>software ImageJ</i> ; (C) Comparação dos resultados obtidos pelos <i>softwares</i> GLT e <i>ImageJ</i>	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Médias das resistências ao cisalhamento das linhas de cola de <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Pinus elliottii</i>	20
Tabela 2 - Resultados dos ensaios físicos e mecânicos a 12% de umidade	33
Tabela 3 - Resultados considerando todos os corpos de prova das vigas de MLC.....	44
Tabela 4 - Resultados do teste de Nemenyi entre os três métodos.....	46
Tabela 5 - Porcentagem de adesivo na região de ruptura – viga 1 de MLC	44
Tabela 6 - Porcentagem de adesivo na região de ruptura – viga 2 de MLC	46
Tabela 7 - Porcentagem de adesivo na região de ruptura – viga 3 de MLC	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
EN	Norma Europeia
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
MLC	Madeira Lamelada Colada
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 MADEIRA.....	15
3.2 MADEIRA DE REFLORESTAMENTO.....	16
3.3 MADEIRA LAMELADA COLADA	16
3.4 QUALIDADE DE COLAGEM.....	18
3.5 ADESIVOS.....	20
3.6 PESQUISAS DESENVOLVIDAS SOBRE MLC	22
4 MATERIAIS E METÓDIOS	24
4.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CARACTERIZAÇÃO.....	24
4.2 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE	25
4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS	25
4.4 CONFECÇÃO DAS VIGAS DE MLC	27
4.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO NAS LINHAS DE COLA	28
4.6 ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DA RUPTURA.....	29
4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	31
5. RESULTADOS.....	33
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DAS MADEIRAS.....	33
5.2 QUANTIFICAÇÃO DAS RUPTURAS DAS REGIÕES DE COLAGEM.....	33
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS.....	40
APÊNDICE A – RESULTADOS DAS PORCENTAGENS DE RUPTURA NO ADESIVO DOS CORPOS DE PROVA DE MLC.....	44

1 INTRODUÇÃO

A madeira como material de construção apresenta inúmeras propriedades e características que a tornam atraente quando comparada aos outros materiais. A madeira é um recurso renovável e sustentável, tem baixo consumo de energia no seu processamento, bom isolamento térmico e acústico, boa relação resistência/peso, entre outras vantagens.

Dentre os produtos derivados da madeira, pode-se destacar a madeira lamelada colada (MLC), que consiste na união de lamelas dispostas com as fibras paralelas entre si por meio de um adesivo sintético. A madeira lamelada colada é recomendada para o uso em estruturas e edificações devido a sua resistência e rigidez elevada, além de permitir uma variedade de aplicações e formatos, como peças de grandes dimensões, peças retas ou curvas, inclusive com dupla curvatura.

Um importante diferencial da madeira lamelada colada é a possibilidade de utilizar lamelas de melhor qualidade em regiões com maior solicitação mecânica e de qualidade inferior nas regiões onde a solicitação é menor (GRANATO, 2011). Existem diversos fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do MLC, como por exemplo: espécie da madeira, o adesivo empregado, a espessura do painel e o seu processo de fabricação.

Para que haja um bom aproveitamento do potencial desse material, é imprescindível uma colagem adequada, levando-se em consideração as características físico-químicas do adesivo e as do próprio material que influenciam na adesão como, por exemplo, a densidade, umidade, porosidade, rugosidade e permeabilidade da madeira.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR (7190, 2022) recomenda o método de ensaio ABNT NBR 17024 (2021) para a verificação da qualidade de colagem de elementos estruturais de madeira lamelada colada, sendo estes a delaminação e a resistência ao cisalhamento nas linhas de cola. Em relação ao ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola, o mesmo consiste em exercer uma pressão na linha de cola, na direção paralela as fibras, até o seu rompimento. O rompimento pode ocorrer na linha de cola ou na madeira, sendo considerado uma colagem satisfatória quando a maior porcentagem de ruptura ocorre na madeira.

Segundo Nogueira (2017) atualmente não existe uma recomendação normativa em relação a quantificação da porcentagem de ruptura na região da colagem e esta é obtida visualmente. Dessa forma, os resultados acabam sendo subjetivos e imprecisos.

Um grupo de pesquisadores da UNESP de Itapeva em parceria com o Departamento de Ciência da Computação da UNESP/Bauru desenvolveram o *software GLT Rupture Analysis* como uma forma mais prática de quantificar a porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo através de fotos das regiões rompidas. Através de uma foto da região rompida, o *software* quantifica a porcentagem de madeira e adesivo pela análise de imagens e quantificação do número de pixels. O *software* foi desenvolvido inteiramente em linguagem de programação Python.

Por outro lado, existe no mercado o *software* profissional *ImageJ* que é um processador de imagens amplamente utilizado no meio técnico para análises com o auxílio de um scanner (SOUZA, 2009), que se apresenta como uma alternativa promissora para uma quantificação mais precisa da porcentagem de ruptura.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo geral o desenvolvimento e avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC de madeiras de pinus com resina a base de resorcinol-formaldeído.

Os objetivos específicos foram:

- Realizar a caracterização mecânica das madeiras para determinação da classe de resistência;
- Quantificar a porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo na interface entre lamelas, de corpos de prova de MLC, através dos softwares ImageJ, GLT Rupture Analysis e através da malha quadriculada, com posterior comparação dos resultados obtidos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A seção a seguir apresenta uma revisão bibliográfica sobre a madeira do ponto de vista biológico e como um material construtivo, madeiras de reflorestamento, painéis de madeira lamelada colada, adesivos, qualidade de colagem e estudos realizados na área.

3.1 Madeira

A madeira é um material de origem orgânica e de composição bastante complexa já que é formada por diversos tipos de células que realizam diferentes funções. A madeira apresenta algumas particularidades que influenciam na sua aplicação como, por exemplo: heterogeneidade; anisotropia, ou seja, possui características diferentes nos seus três principais planos de corte (transversal, tangencial e radial); está sujeita a ação de organismos xilófagos (como fungos, bactérias e insetos), porém contanto que a madeira esteja devidamente preparada e tratada a probabilidade desses ataques são bem reduzidas; higroscopicidade, que é a capacidade de absorver ou perder água para o meio ambiente; a presença de nós, os quais impactam negativamente na resistência mecânica da madeira; além de apresentar uma grande variabilidade natural entre suas propriedades, não só entre espécies diferentes como também entre peças retiradas de uma mesma árvore (SERENINE JUNIOR *et al.*, 2019).

De acordo com Pedreschi, Gomes e Mendes (2005) construções e estruturas de madeira no Brasil são tratadas com receio e suspeitas, o que se deve principalmente à falta de conhecimento das suas propriedades mecânicas, questionamentos acerca da sua qualidade como material estrutural, o uso de forma inadequada que acaba comprometendo o desempenho do material (como vigas fletindo por causa de mau dimensionamento) e associação equivocada com o desmatamento. Desta forma, percebe-se que a desinformação impede que o potencial da madeira seja visto e corretamente explorado.

Além disso, a consolidação da cultura do concreto também foi um dos principais fatores que causaram a despolarização da madeira como material construtivo, o qual passou a ser visto como uma alternativa mais segura, versátil e eficiente, dessa

forma o concreto se tornou o principal componente utilizado na construção civil no Brasil (PAULI; AZAMBUJA; OLIVEIRA NETO, 2021).

A madeira quando comparada a outros materiais se mostra uma alternativa promissora, já que apresenta uma resistência maior que a do concreto convencional e esta não se altera quando submetida a altas temperaturas (ao contrário do que acontece com o aço), ou seja, a madeira consegue suportar a ação do fogo durante um período de tempo maior (GESUALDO, 2003). Além de apresentar outras vantagens como renovável, isolante térmico e acústico, redutor de gás carbônico da atmosfera e de fácil manuseio (CARLO, 1998).

A fabricação de painéis de madeira representa uma excelente alternativa para substituir a madeira serrada em diversos segmentos da indústria, incluindo a fabricação de móveis e a construção civil.

3.2 Madeira de reflorestamento

O reflorestamento é uma alternativa ao desmatamento de florestas nativas, ou seja, a madeira de reflorestamento é obtida por meio de árvores que já foram plantadas com o objetivo de serem extraídas. O Brasil está entre os 10 maiores produtores de florestas plantadas do mundo, que são destinadas principalmente para os setores de celulose, madeira serrada, painéis, construção civil e carvão vegetal (JUVENAL; MATTOS, 2002).

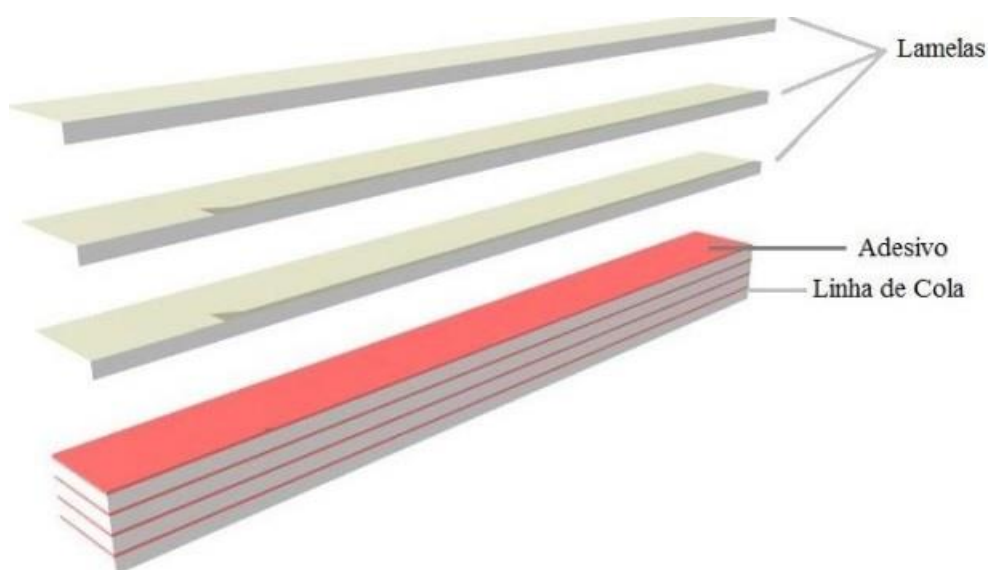
Segundo a Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2021) a área total de árvores plantadas contabilizou 9,55 milhões de hectares em 2020, 78% desse valor corresponde ao plantio de eucalipto e 18% de pinus. Os estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul se sobressaem como os principais produtores do país.

3.3 Madeira Lamelada Colada

A madeira lamelada colada foi criada e utilizada pela primeira vez na construção de um auditório na Suíça em 1893 pelo alemão Friedrich Otto Hetzer e devido ao grande sucesso da obra foram construídos mais de 200 prédios com vigas e arcos de MLC (SERRANO, 2013).

A MLC é composta por duas ou mais lamelas cujas direções das fibras são posicionadas paralelamente ao comprimento do elemento estrutural, as lamelas são unidas por meio de um adesivo e a aplicação de pressão. As lamelas apresentam a mesma espessura que geralmente varia de 2,5 cm a 5 cm (STARK; CAI; CARLL, 2021). A Figura 1 ilustra o e posicionamento das lamelas e a aplicação de adesivo para a colagem destas.

Figura 1 – Esquema de uma viga estrutural de MLC



Fonte: Cavalleiro (2014).

Algumas das principais vantagens da MLC consistem na sua grande variedade de formas e dimensões, resistência mecânica elevada e peso próprio relativamente baixo, redução dos defeitos como nós (que são geralmente encontrados em madeira maciça de grandes dimensões), alta resistência ao fogo e agentes corrosivos em função de suas grandes seções transversais (SEGUNDINHO *et al.*, 2013; ZANGIÁCOMO, 2003).

A escassez de madeiras nativas também é um dos motivos para o uso da MLC, pois essa permite a utilização, de forma racional, de madeiras de reflorestamento, como o pinus e eucalipto, com isso em mente diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas nesse âmbito (MIOTTO, 2009).

Zangiácomo (2003) apresenta como desvantagens da MLC o seu custo elevado quando comparado à madeira maciça, pois exige técnicas, equipamentos especiais e mão-de-obra especializada para sua fabricação.

Há uma variedade de espécies que podem ser utilizadas na fabricação do MLC, no entanto é observado uma certa preferência na indústria pelo uso de coníferas (como é o caso do pinus) por apresentarem uma excelente interação e penetração com adesivos (ICIMOTO, 2013; MOODY; LIU, 1999; SERRANO, 2003). O gênero eucalipto possui uma variedade de espécies, porém poucas são de fácil colagem, já que a maioria apresenta alta densidade e teores de extrativos elevados (MOTTA; OLIVEIRA; ALVES, 2013).

A densidade da madeira é um parâmetro importante que deve ser levado em consideração, a ABNT NBR 7190 (2022) recomenda que sejam empegadas espécies de madeira cuja densidade aparente (na condição de 12% de umidade) esteja dentro da faixa de 0,40 g/cm³ a 0,75 g/cm³. Além disso, a norma também estabelece que o adesivo utilizado deve ser a prova d'água.

É de fundamental importância que haja a caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira e o controle de qualidade na fabricação da MLC, especialmente para usos estruturais, para que assim seja utilizada corretamente e haja um melhor aproveitamento desta, principalmente em relação a durabilidade, uso estrutural e segurança (CALIL NETO, 2011; ZANGIÁCOMO, 2003).

Em países em que a utilização de produtos de MLC é mais difundida já existem normas específicas referente ao seu controle de qualidade. No Brasil a norma específica de recomendações para projetos de estruturas de madeira é a NBR 7190 (2022). Essa norma passou por revisão recentemente e recomenda o método de ensaio ABNT NBR 17024 (2021), que é baseado na norma europeia EN 14080 (2013), para o controle de qualidade, o qual especifica os ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola através de amostras retiradas dos elementos de MLC confeccionados. Após o ensaio de cisalhamento na linha de cola é possível realizar a quantificação da porcentagem de ruptura e determinar se o rompimento ocorreu predominantemente na madeira, sendo este o ideal, ou no adesivo.

3.4 Qualidade de colagem

A qualidade da colagem, e dessa forma a resistência mecânica dos elementos de MLC, é uma consequência do processo de fabricação, das características da madeira e composição do adesivo (BURDURLU *et al.*, 2007).

As principais causas mais comuns que ocasionam em falhas na colagem são: quantidade insuficiente de adesivo, presença de impurezas na superfície que vai ser colada (como extrativos), pressão insuficiente e teor de umidade inadequado (CALLEJAS OLMOS, 1992).

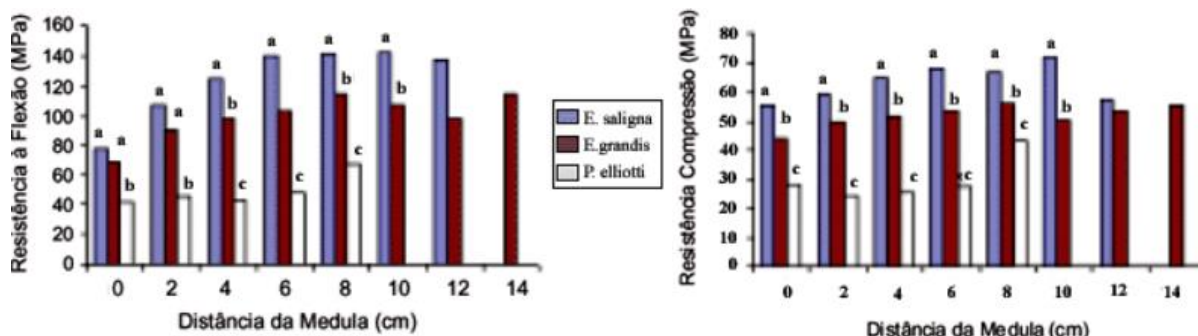
As propriedades físicas da madeira têm um grande impacto durante a colagem, especialmente a densidade e o teor de umidade. Segundo Vick (1999) madeiras mais densas são difíceis de colar pois apresentam um menor volume de lúmen, paredes celulares mais grossas e menos poros, o que dificulta a penetração do adesivo. Ressaltando que madeiras de baixa densidade são mais porosas e tendem a ter uma maior penetração do adesivo e sem os devidos cuidados pode resultar em uma linha de cola faminta, ou seja, com a penetração excessiva do adesivo. Azambuja *et al.* (2013) indicam que sejam utilizadas espécies de madeira com densidade aparente (na condição de 12% de umidade) entre 400 a 750 kg/m³.

Conforme Issa e Kmeid (2005) o teor de umidade das lamelas de MLC devem estar na faixa de 10-16%. A variação do grau de umidade entre as lamelas não deve ultrapassar a 5% durante a colagem para evitar variações dimensionais no elemento estrutural, ou seja, fenômenos de inchamento e retração (NOGUEIRA, 2017).

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), as pressões aplicadas na fabricação das vigas de MLC podem variar entre 0,7 e 1,5 MPa. Para madeiras com densidade igual ou inferior a 0,50 g/cm³, a pressão de colagem recomendada é de 0,70 MPa e para madeiras com densidade superior a 0,50 g/cm³ a pressão é de 1,2 MPa.

Em um estudo realizado por Serpa *et al.* (2003), foram investigadas algumas propriedades de madeiras das espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. Foram avaliados os seguintes parâmetros: densidade básica, retração volumétrica total, resistência à flexão estática, resistência à compressão paralela e qualidade da linha de cola (foi utilizado o adesivo à base de acetato de polivinila para todas as espécies). As madeiras de eucalipto em geral apresentaram propriedades mais elevadas que à de pinus (Figura 2), inclusive médias de resistência das linhas de cola superiores (Tabela 1). Em relação a falha na madeira, todas as espécies tiveram porcentagens altas de falha na madeira em torno de 70 a 90%.

Figura 2 - Média geral da resistência à flexão estática e compressão paralela às fibras, respectivamente



Fonte: Serpa et al. (2013).

Tabela 1 - Médias das resistências ao cisalhamento das linhas de cola de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*

Posição na Tábua	Espécie	Resistência média (MPa)
Próximo à medula	<i>Eucalyptus saligna</i>	10,90
	<i>Eucalyptus grandis</i>	11,72
	<i>Pinus elliottii</i>	8,43
Próximo à casca	<i>Eucalyptus saligna</i>	10,62
	<i>Eucalyptus grandis</i>	10,99
	<i>Pinus elliottii</i>	7,49

Fonte: Serpa et al. (2013).

3.5 Adesivos

Os adesivos possuem propriedades aderentes (ligantes), ou seja, são substâncias que servem para manter unidos dois ou mais materiais por meio de uma superfície de contato. Um dos principais usos dos adesivos é na produção de produtos engenheirados de madeira, como painéis compensados, aglomerados, Oriented Strand Board, Cross Laminated Timber e o MLC.

Os adesivos podem ser divididos de forma geral em duas classes: de origem natural e sintéticos. Dentre os adesivos naturais, temos os à base de óleo de soja, óleo de oliva, óleo de girassol, óleo de mamona, taninos entre outros. Quanto aos adesivos sintéticos, eles podem ser separados em termofixos ou termoendurecedores (como a ureia-formaldeído e o fenol-formaldeído) e os termoplásticos (acetato de polivinila e policloreto de vinila).

É importante destacar que uma espécie que não apresentou uma boa adesão com determinado adesivo pode ter um desempenho satisfatório com resinas de formulações diferentes (VICK, 1999). As propriedades dos adesivos que afetam diretamente a colagem são a viscosidade, o pH, tempo de gelatinização e teor de substâncias sólidas (ALMEIDA *et al.*, 2010).

A viscosidade está relacionada com o escoamento de um fluido, quanto maior a viscosidade de uma substância maior a sua resistência para fluir, ou seja, são líquidos mais grossos e menos fluidos. Adesivos de alta viscosidade são mais difíceis de serem distribuídos de maneira uniforme sobre a região de colagem, o que resulta em uma baixa penetração do adesivo na estrutura capilar da madeira e em linhas de cola espessas (BIANCHE, 2014).

O tempo de gelatinização pode ser definido como o tempo transcorrido desde a preparação do adesivo para o uso até o seu endurecimento, também chamado de fase de gel, quando alcança a sua máxima elasticidade. De acordo com Almeida (2009) o tempo de gelatinização é importante pois ele indica a vida útil do adesivo (o ponto de máxima viscosidade em que ainda é possível a sua aplicação) e a reatividade (quanto mais reativo menor o tempo de prensagem).

O teor de substâncias sólidas é basicamente a quantidade de sólidos presentes na resina. No processo de prensagem ocorre a evaporação dos componentes líquidos do adesivo e a cura, que é a solidificação do adesivo e quando ele atinge a sua rigidez final, formando assim a linha de cola.

Quando a colagem é realizada de uma maneira apropriada, as uniões feitas por meio de adesivos fenólicos apresentam uma longa durabilidade e uma linha de cola de coloração escura, mas um dos inconvenientes é o custo elevado do fenol, já que a sua matéria-prima é o petróleo (JESUS, 2000).

Segundinho *et al.* (2017) afirmam que o resorcinol-formaldeído, a melaminauréia-formaldeído e o poliacetato de polivinila apresentam resultados satisfatórios em relação a penetração e contato adesivo-madeira, e dessa forma uma boa resistência nos ensaios de delaminação e cisalhamento.

Resinas a base de resorcinol-formaldeído, conhecidas também pelo nome comercial Cascophen-RS-216, são capazes de promover uma alta adesão, são a prova d'água e apresentam alta resistência a intempéries caso sejam expostos a condições adversas, como chuvas e tempestades (CERCHIARI, 2013).

Plaster *et al.* (2008) conduziram um estudo avaliando a capacidade de adesão da madeira serrada de *Eucalyptus sp* com adesivos à base de resorcinol-formaldeído e acetato de polivinila. As madeiras foram classificadas em três lotes de acordo com as suas densidades, então foram coladas peças de mesmo lote e de diferentes classes de densidade também. Após a adesão foram realizados os ensaios de cisalhamento paralelo às fibras e avaliação do percentual de falha na madeira, em geral todos os corpos de prova apresentaram desempenhos satisfatórios. Contudo, o adesivo a base de resorcinol-formaldeído apresentou valores de falha maiores que o acetato de polivinila em quase 10%, observou-se também que as amostras de madeiras mais densas foram mais difíceis de colar.

3.6 Pesquisas desenvolvidas sobre MLC

Bianchi (2020) estudou a delaminação e a resistência da linha de cola de elementos de MLC. Para isso ela utilizou madeira de eucalipto e pinus, adesivos de resorcinol-formaldeído, poliuretana (monocomponente e bicomponente) e preservante CCA. As lamelas foram confeccionadas com dimensões de 2 cm x 5 cm x 120 cm com 5 lamelas para cada elemento de MLC. A gramatura de colagem adotada foi de 240 g/m² e a pressão de colagem 1,2 MPa para as peças de pinus e 0,7 MPa para as peças de eucalipto. Após a confecção dos elementos de MLC com as diferentes combinações de espécie, adesivo e o uso de preservante ou não, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de delaminação e cisalhamento, em conformidade com as recomendações da norma ABNT NBR 7190 (2022). A partir dos ensaios de delaminação observou-se que apenas as madeiras de eucalipto in natura com os adesivos resorcinol formaldeído e poliuretana bicomponente, e de pinus in natura com resorcinol formaldeído apresentaram valores dentro do aceitável de 4% estipulado pela norma ABNT NBR 7190 (2022). Já para a análise da resistência ao cisalhamento das linhas de cola foi verificado uma grande variabilidade entre os resultados de uma mesma combinação, o que pode ser justificado pela heterogeneidade intrínseca da madeira e a sua influência nos diferentes desempenhos de cada linha de cola. Por fim, grande parte das combinações apresentaram falhas na madeira em torno de 90%, dessa forma indicando uma colagem eficiente.

Páschoa (2018) verificou a delaminação e resistência da linha de cola de amostras retiradas de seis vigas de MLC de eucalipto com 5 lamelas cada e com

dimensões de 2 cm x 5 cm x 120 cm, as quais foram unidas por meio do adesivo fenólico Cascophen RS-216M com catalisador em pó e gramatura de 200 g/m². As vigas de MLC foram divididas em dois grupos, no primeiro foi aplicado um torque de 60 N.m e no segundo um torque de 13,64 N.m. Observou-se que a aplicação de diferentes pressões ocasionou em diferentes porcentagens de delaminação das linhas de cola, contudo nos dois casos os resultados foram predominantemente superiores ao limite de 6% indicado pela norma ABNT NBR 7190 (2022). Por fim, foi concluído que o uso de diferentes pressões influenciou na resistência ao cisalhamento das linhas de cola, as amostras das vigas coladas com torque de 60 N.m foram em média mais resistentes e apresentaram em torno de 72% de ruptura na madeira, enquanto que as vigas coladas com torque de 13,64 N.m apresentaram apenas 43% de ruptura na madeira.

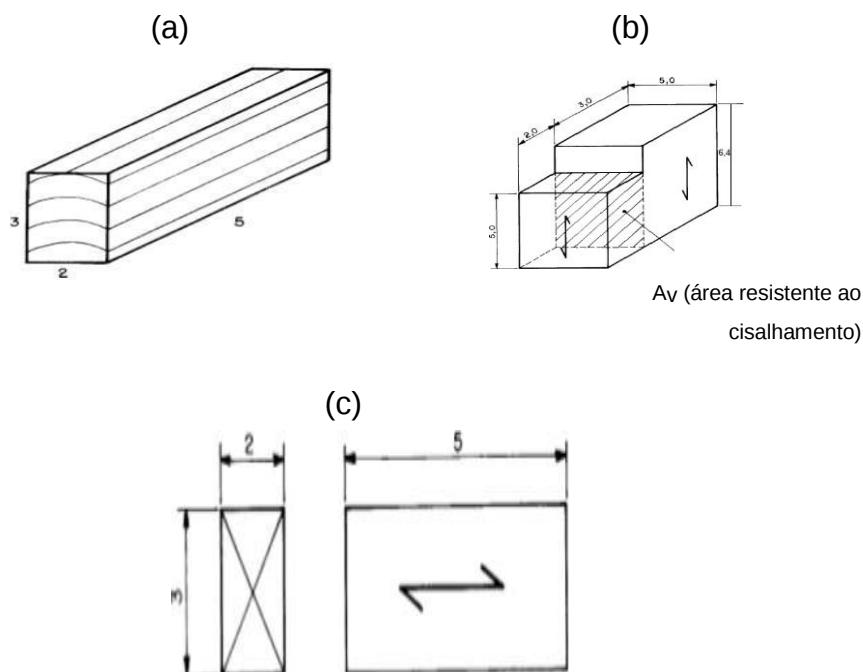
Jesus (2000) realizou uma pesquisa sobre o uso da resina poliuretana à base de óleo de mamona na fabricação de madeira laminada colada. O autor avaliou a sua eficácia através de ensaios mecânicos de cisalhamento, tração paralela e normal às fibras, adotando as recomendações descritas na ABNT NBR 7190:97. Os resultados obtidos pelo autor indicaram que o adesivo à base de mamona penetrou na estrutura anatômica da madeira e forneceu uma boa adesão, já que mais da metade dos corpos de prova de pinus e quase todos de eucalipto obtiveram a sua ruptura predominantemente na madeira (intervalo de 80 a 100%). O autor justifica essa diferença entre as espécies pela presença de resinas e outras características típicas da madeira de pinus que podem ter afetado a colagem.

4 MATERIAIS E METÓDIOS

4.1 Confeção dos corpos de prova de caracterização

A partir de um lote de 12 m³ de vigas serradas de madeira de *Pinus ssp.* (dimensões 6 x 16 x 300 cm) foram confeccionadas lamelas de dimensões de 2 cm x 5 cm x 120 cm, retiradas aleatoriamente do lote em questão para confecção das vigas de MLC. A partir dessas vigas serradas também foram confeccionados os corpos de prova para caracterização física e mecânica das madeiras utilizadas, com as dimensões padronizadas conforme a norma ABNT NBR 7190 (2022) (Figura 3). Os ensaios de caracterização realizados foram: compressão paralela (f_{c0}), cisalhamento (f_{v0}), e tração paralela (f_{t0}), além de ensaios para determinação da umidade e densidade aparente a 12%. Para o ensaio de compressão paralela às fibras foi obtido o módulo de elasticidade (E_{c0}).

Figura 3 - Dimensões em cm dos corpos de prova: (a) compressão; (b) cisalhamento; (c) densidade e umidade



Fonte: ABNT NBR 7190 (2022).

4.2 Determinação da umidade

Para a determinação da umidade foram medidas as massas iniciais dos corpos de prova com a balança de precisão. Logo após os corpos de prova foram colocados na estufa com temperatura máxima de $103^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$. Durante a secagem a massa dos corpos de prova foram medidas a cada 6 h, até que atingiu uma variação máxima de 0,5% entre duas medidas consecutivas. Essa massa foi considerada a massa seca e a partir disso foi calculado o teor de umidade de acordo com a Equação 1.

$$TU(\%) = \frac{\mu - ms}{ms} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

TU: teor de umidade da madeira;

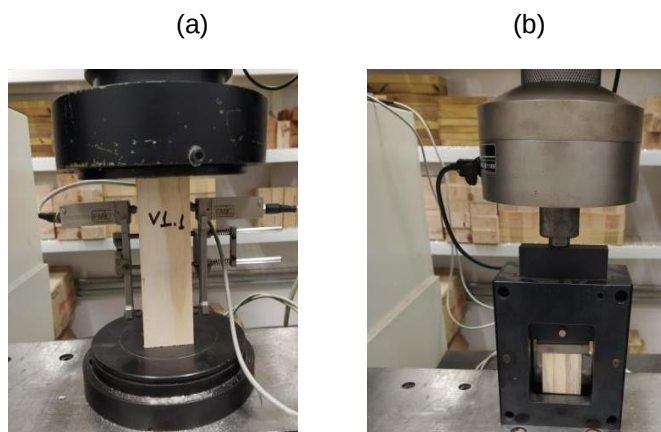
μ : massa inicial do corpo de prova, em gramas;

ms : massa seca do corpo de prova, em gramas.

4.3 Ensaios de caracterização das madeiras

Os ensaios de compressão paralela às fibras (Figura 4a) e cisalhamento (Figura 4b) das madeiras foram realizados na máquina universal de ensaios marca EMIC com capacidade de 300 kN. Já o ensaio de flexão estática foi feito utilizando-se o método não destrutivo de técnica de excitação por impulso pelo equipamento da marca Sonelastic (Figura 5).

Figura 4 - Ensaios: (a) Compressão paralela as fibras; (b) Cisalhamento



Fonte: Próprio autor.

Figura 5 - Ensaio de flexão estática não destrutivo - sonelastic



Fonte: Próprio autor.

Os valores característicos das propriedades das madeiras foram obtidos a partir do estimador centrado apresentado na Equação 2.

$$f_{w,k} = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (2)$$

Onde:

$f_{w,k}$: valor característico de resistência;

n : número de corpos de prova.

Para a aplicação da Equação 2, os valores de resistência foram colocados em ordem crescente, de modo que $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$, visto que o estimador centrado utiliza apenas a metade menos resistentes dos resultados.

A densidade aparente é a razão entre a massa e o volume dos corpos de prova com o teor de umidade de 12% e foi determinada por meio da Equação 3.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{ap} : densidade aparente, em kg/cm³;

m_{12} : massa da madeira a 12% de umidade, em kg;

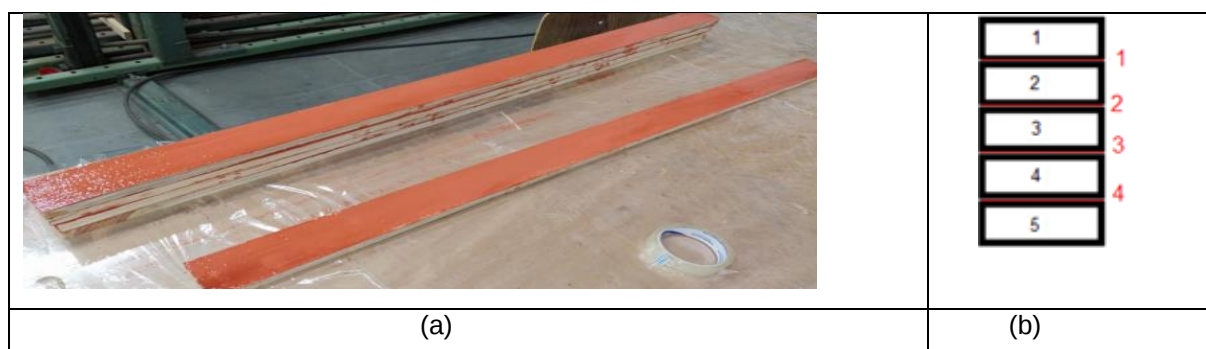
V_{12} : volume da madeira a 12% de umidade, em cm³.

4.4 Confeção das vigas de MLC

Foram confeccionadas 3 vigas de MLC (total de 5 lamelas e 4 linhas de cola), e na colagem foi utilizada o adesivo fenólico Cascophen RS216-M com catalisador em pó. Esse adesivo foi escolhido por ser de coloração escura e a madeira de pinus por ser de coloração mais clara, o que facilitou a identificação das áreas rompidas pelos *softwares* e pela malha quadriculada. As vigas foram coladas com umidade de 12% e uma gramatura de adesivo igual a 240 g/m² com aplicação nas duas faces da lamela (Figura 6).

As lamelas das vigas passaram por processo de classificação mecânica e visual e as vigas de maior módulo de elasticidade foram posicionadas nos extremos da seção transversal (lamelas 1, 2, 4 e 5) e as vigas de menor módulo de elasticidade foi posicionada na parte central sobre a linha neutra da seção.

Figura 6 - Detalhe da confecção das vigas de MLC: (a) Colagem das lamelas; (b) seção transversal das vigas e numeração das lamelas e linhas de cola



Fonte: Próprio autor.

A colagem das vigas foi feita com uso de uma prensa de fuso (Figura 7) e a pressão de colagem foi controlada com o auxílio de um torquímetro. Utilizou-se, neste caso, uma pressão de colagem de 0,7 MPa. O tempo de cura do adesivo foi de aproximadamente 72 horas.

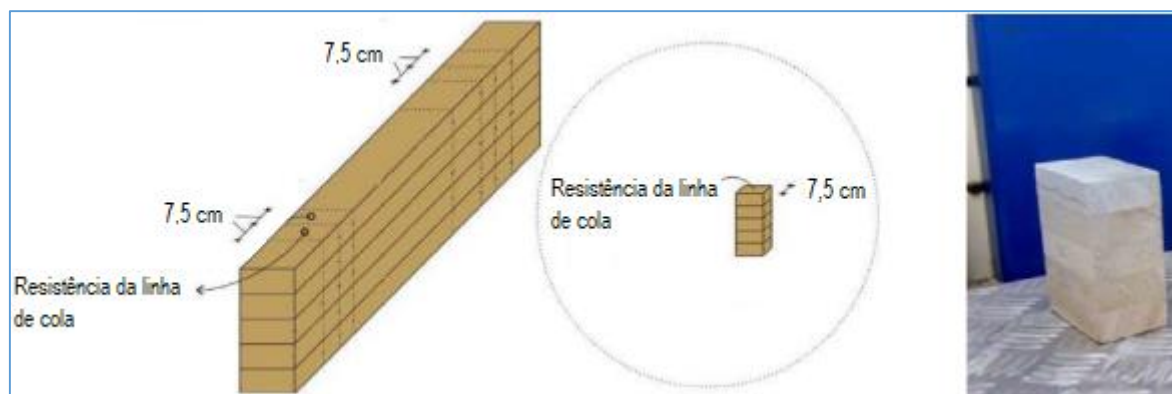
Figura 7 - Colagem das vigas de MLC na prensa de chão



Fonte: Próprio autor.

Posteriormente, destas vigas de MLC foram retirados os corpos de prova (Figura 8) de dimensões 5 cm x 10 cm x 7,5 cm para os ensaios de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola. Foram retirados 16 corpos de prova das vigas 1 e 3 e 12 corpos de prova da viga 2.

Figura 8 - Retirada dos corpos de prova de teste das vigas de MLC

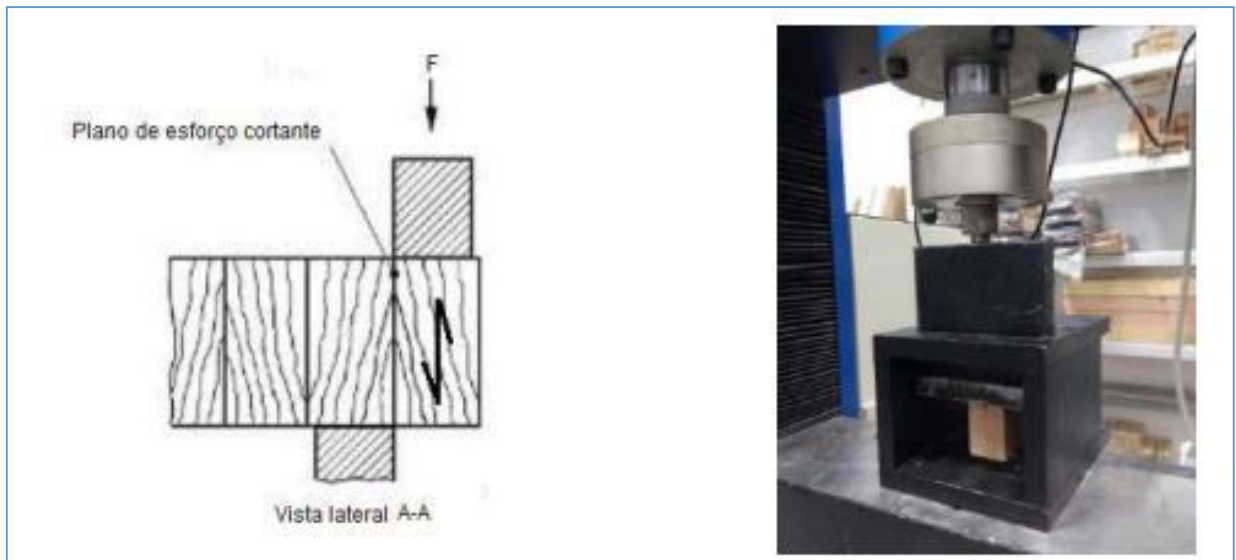


Fonte: Próprio autor.

4.5 Ensaio de cisalhamento nas linhas de cola

Os ensaios de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola foram realizados segundo o projeto de norma ABNT NBR 17024 (2021) recomendado pela versão revisada ABNT NBR 7190 (2022). Para a determinação da resistência ao cisalhamento nas linhas de cola foi acoplado um dispositivo metálico, confeccionado especialmente para este ensaio com a máquina universal de ensaios EMIC (Figura 9).

Figura 9 - Ensaio de cisalhamento na linha de cola segundo ABNT NBR 17024 (2021)



Fonte: Próprio autor.

A resistência ao cisalhamento da linha de cola foi obtida de acordo com a Equação 4.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b \times t} \quad (4)$$

Onde:

f_{v0} : resistência ao cisalhamento da linha de cola, em megapascals;

$F_{v0,max}$: força máxima cisalhante aplicada na lamela de ruptura, em newtons;

b : largura do corpo de prova, em mm;

t : altura do corpo de prova, em mm.

4.6 Análise e quantificação da ruptura

Para a estimativa da área de ruptura apenas uma metade do corpo de prova foi considerada para a análise, já que a outra metade apresentava a porcentagem restante.

Para a quantificação da porcentagem de ruptura, cada uma das metades dos corpos de prova ensaiados foi fotografada com posição e iluminação fixa em relação ao corpo de prova em análise.

Para a análise das imagens pela malha quadriculada foi utilizado um programa de edição de imagens chamado *Photoscape®* para a divisão desta em 100 partes (10 x 10). A Figura 10 mostra os detalhes da área de colagem de um dos corpos de prova, a região mais escura indicou ruptura no adesivo e a região mais clara apontou ruptura na madeira.

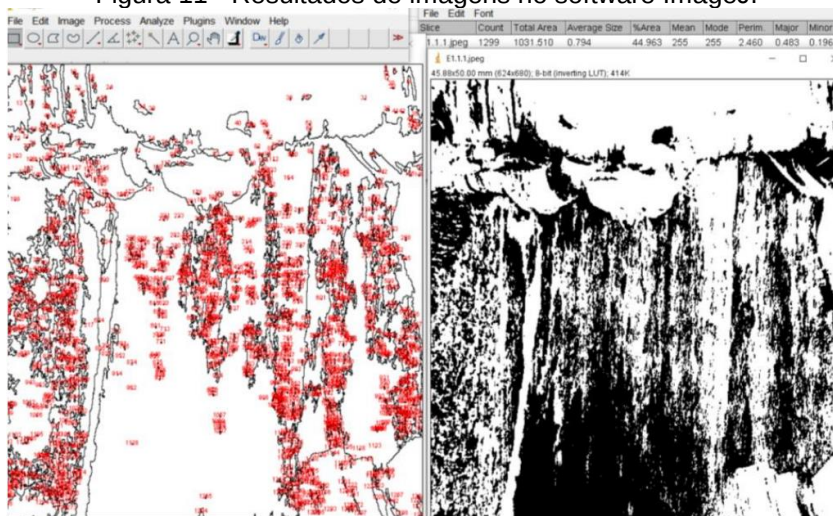
Figura 10 - Análise da região de colagem após ensaio de cisalhamento na linha de cola



Fonte: Próprio Autor.

No *software ImageJ* as fotos foram carregadas e analisadas individualmente. Primeiramente, foi carregada a imagem com o formato TIFF (sem compactação) e convertida para 8 bits. Após isso, foi selecionada a função *analyse particles*, que forneceu o tamanho em pixels de cada partícula. Dessa forma, a área das partículas corresponde à porcentagem de adesivo na área rompida (Figura 11).

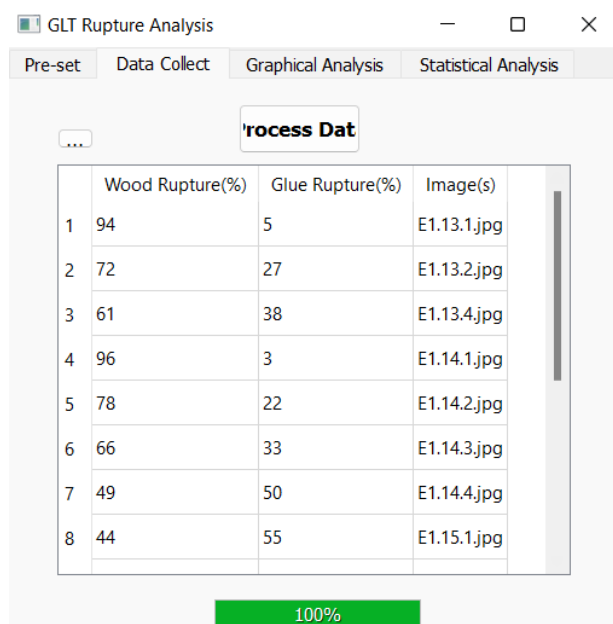
Figura 11 - Resultados de imagens no software ImageJ.



Fonte: Próprio Autor.

O banco de dados do *software GLT Rupture Analysis* permitiu o carregamento de diversas imagens (na extensão de arquivo JPEG) de uma só vez. Foi realizada a análise simultânea das imagens e após o processamento o *software* apresentou a porcentagem da área de ruptura obtida no adesivo e na madeira (Figura 12).

Figura 12 - Resultados das imagens no software GLT Rupture Analysis



	Wood Rupture(%)	Glue Rupture(%)	Image(s)
1	94	5	E1.13.1.jpg
2	72	27	E1.13.2.jpg
3	61	38	E1.13.4.jpg
4	96	3	E1.14.1.jpg
5	78	22	E1.14.2.jpg
6	66	33	E1.14.3.jpg
7	49	50	E1.14.4.jpg
8	44	55	E1.15.1.jpg

100%

Fonte: Próprio Autor.

A apresentação dos resultados foi feita em relação a porcentagem de ruptura no adesivo, já que o *software ImageJ* admite a região escurecida da imagem como sendo o adesivo e dessa forma facilitou também a análise visual por meio da malha quadriculada. A região complementar de cada face analisada correspondeu à porcentagem de ruptura na madeira.

4.7 Análise estatística

Para a análise estatística dos dados foi utilizado o software de código aberto R (versão 4.2.0). Primeiramente foi realizado o teste de normalidade de dados de Anderson Darling, por este ser indicado para amostras maiores que 50.

Ao ser constatada a não normalidade dos dados, utilizou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis para a comparação entre as porcentagens de ruptura obtidas por cada um dos três métodos. Após isso, foi empregado o teste de

comparação múltipla de Nemenyi para a realização de comparações em pares a fim de verificar quais dos métodos diferiram entre si.

O nível de significância adotado para todos os testes estatísticos foi de 5%, o qual correspondeu a probabilidade de rejeição da hipótese nula H_0 (médias iguais) quando esta foi verdadeira. Para valor-p menor que o nível de significância de 0,05, a hipótese nula foi rejeitada e então aceita a hipótese alternativa H_1 (médias eram diferentes).

5. RESULTADOS

5.1 Caracterização física e mecânica das madeiras

A Tabela 2 apresenta os resultados da caracterização física e mecânica das 4 vigas de madeira que foram utilizadas para a confecção das 3 vigas de MLC.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios físicos e mecânicos a 12% de umidade

Viga	ρ_{ap} (kg/cm ³)	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)
1	452,51	41,44	53,81	13,43	6699,68
2	462,24	43,12	56,00	13,61	9537,92
3	367,91	41,11	53,40	10,15	6627,78
4	452,33	35,65	43,30	13,73	8406,19
Média	433,75	40,33	52,38	12,73	7817,89

Serpa *et al.* (2003) encontraram valores de resistência à flexão que variam de 40 a 70 MPa e para a resistência à compressão paralela às fibras de 25 a 45 MPa para o *Pinus elliottii*, dessa forma observou-se que as resistências encontradas estão em conformidades com a literatura.

Segundo a norma NBR 7190 (2022), as quatro vigas são classificadas como C30 coníferas, levando em consideração a sua resistência a compressão paralela às fibras.

5.2 Quantificação das rupturas das regiões de colagem

A Tabela 3 apresenta a média das porcentagens de ruptura considerando todos os corpos de prova retirados das três vigas de MLC e as medidas de dispersão para cada caso.

Tabela 3 - Resultados considerando todos os corpos de prova das vigas de MLC

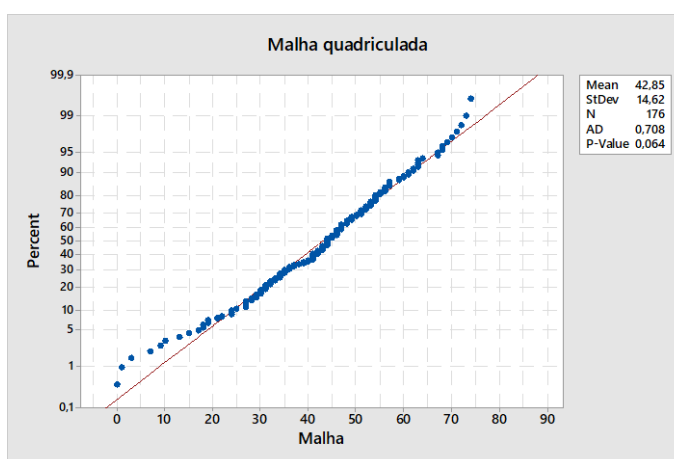
Valores de dispersão	% de Ruptura no adesivo (malha quadriculada)	% de Ruptura no adesivo (<i>ImageJ</i>)	% de Ruptura no adesivo (<i>GLT Rupture Analysis</i>)
<i>Média</i>	42,89	42,77	45,93
<i>Desvio padrão</i>	14,60	13,88	15,25
<i>CV (%)</i>	34,04	32,45	33,2

A porcentagem de ruptura média no adesivo obtida pela malha quadriculada foi de 42,89% (na madeira 57,11%), no *ImageJ* foi de 42,77% (na madeira 57,23%) e pelo GLT foi de 45,93% (na madeira 54,07%). Observou-se que a porcentagem média obtida para a ruptura no adesivo a partir do *software* GLT foi em torno de 7% maior que no *software ImageJ* e na malha quadriculada.

Mais de 50% da porcentagem de ruptura foi na madeira, idealmente esse valor estaria próxima de 90% para indicar uma colagem eficiente, além de que se verificou diferenças significativas entre as linhas de cola em um mesmo corpo de prova.

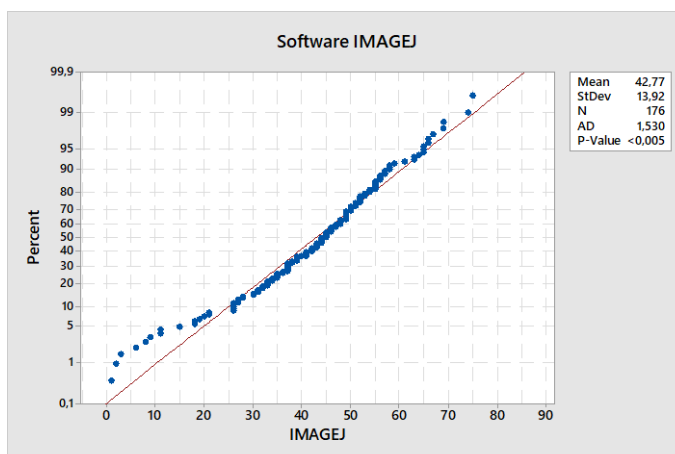
O teste de normalidade para o nível de significância de 5% indicou p-valores de 0,064, <0,005 e 0,023 para as quantificações pela malha quadriculada, *ImageJ* e *GLT Rupture Analysis*, respectivamente. Foi constatado que o conjunto de dados não apresentou uma distribuição normal, com exceção da análise através da malha quadriculada. Os resultados obtidos pelo teste de normalidade estão exibidos nas Figuras 13,14 e 15.

Figura 13 - Teste de normalidade dos dados obtidos através da malha quadriculada



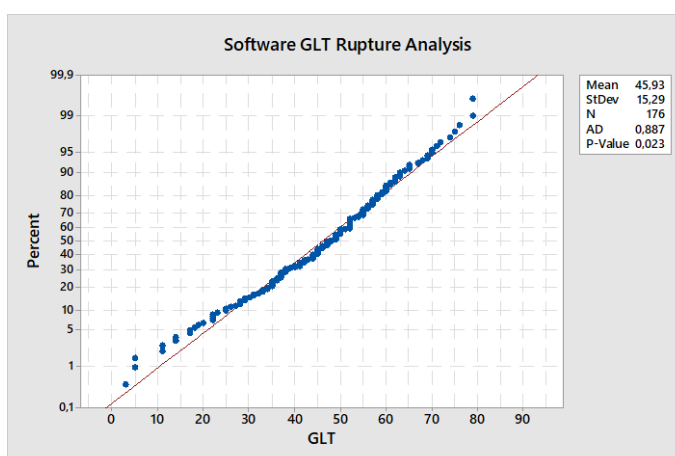
Fonte: Próprio Autor.

Figura 14 - Teste de normalidade dos dados obtidos no software *ImageJ*



Fonte: Próprio Autor.

Figura 15 - Teste de normalidade dos dados obtidos no programa *GLT Rupture Analysis*



Fonte: Próprio Autor.

Como a normalidade dos dados não pôde ser confirmada para todos os dados, optou-se por utilizar testes de comparação não paramétricos. Para a comparação múltipla, foi selecionado o teste de Kruskal-Wallis, que avalia a presença de diferenças significativas entre três ou mais amostras independentes.

Através do teste de Kruskal-Wallis obteve-se o valor p de de 0,04001 para o α adotado de 0,05, dessa forma foi rejeitada a hipótese nula de que não existe uma diferença estatística entre as três análises.

Os resultados do teste de Nemenyi referente a comparação entre as porcentagens médias de ruptura no adesivo obtidas pelos três métodos estão contidos na Tabela 4.

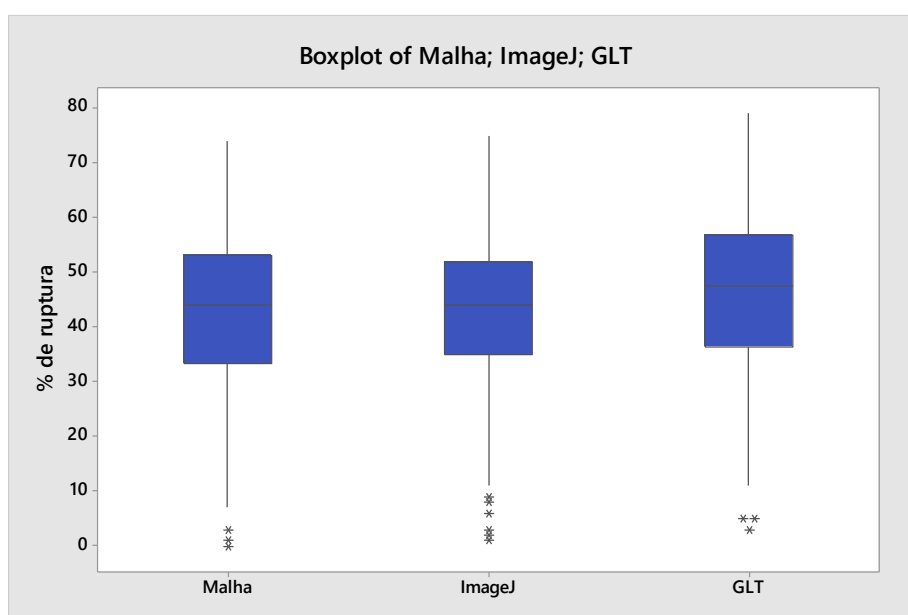
Tabela 4 - Resultados do teste de Nemenyi entre os três métodos

Comparação	Valor - p	Diferem
Malha – <i>ImageJ</i>	0,9541	NÃO
Malha – GLT	0,0480	SIM
<i>ImageJ</i> - GLT	0,0270	SIM

O teste revelou haver diferença significativa nas porcentagens médias de ruptura obtidas pelos *softwares* *ImageJ* e GLT, além do GLT com a malha quadriculada. Uma possível causa para essa diferença pode ser o uso de imagens obtidas por fotografia no *software* *ImageJ* ao invés da imagem escaneada. A imagem analisada por fotografia foi considerada para manter o padrão de qualidade de imagem para ambos os métodos. No entanto, o *software* GLT fornece os resultados em poucos segundos enquanto no *software* *ImageJ* há necessidade de ajuste da imagem demandando mais tempo para obtenção dos resultados.

A Figura 16 apresenta a representação gráfica das porcentagens de ruptura para efeito de comparação dos resultados obtidos. Observou-se que o boxplot dos dados fornecidos pelo *ImageJ* foi mais achatado, ou seja, houve uma menor dispersão dos dados, inclusive o seu coeficiente de variação foi menor que dos demais métodos.

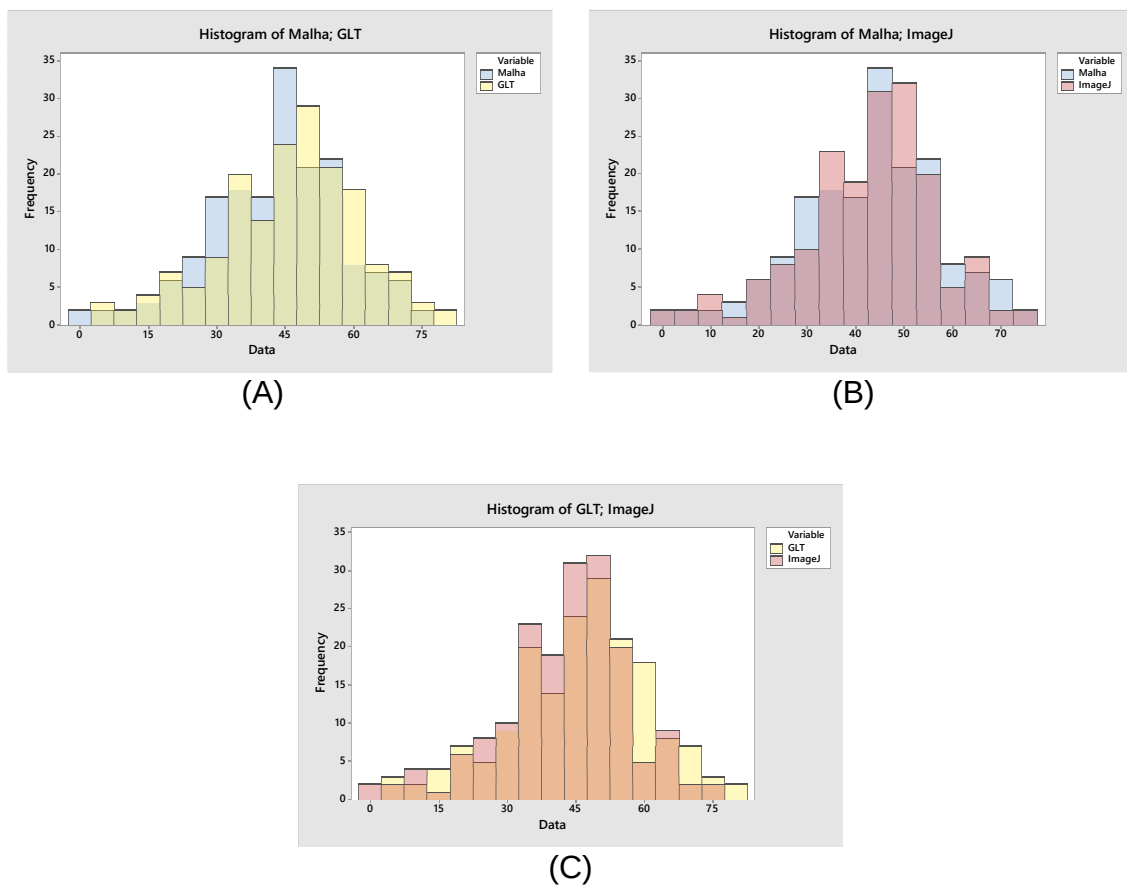
Figura 16 - Diagrama de caixa das porcentagens de ruptura obtidas pelos três métodos



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 17 mostra o histograma das frequências das porcentagens de ruptura obtidas, comparando o método da malha quadriculada com o *GLT Rupture Analysis*, malha e *ImageJ* e por fim o *GLT Rupture Analysis* e *ImageJ*. A cor azul corresponde aos dados referente a malha quadriculada, GLT em amarelo e o *ImageJ* em rosa.

Figura 17 - Histograma dos resultados obtidos pelos três métodos: (A) Comparação dos resultados obtidos pela malha com o *software* GLT; (B) Comparação dos resultados obtidos pela malha com o *software* *ImageJ*; (C) Comparação dos resultados obtidos pelos *softwares* GLT e *ImageJ*



Fonte: Próprio Autor.

Através dos histogramas, ficou evidente que apesar de serem estatisticamente diferentes, em algumas instâncias as porcentagens de ruptura no adesivo dos dois softwares são bastante semelhantes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ambos os softwares analisados nesta pesquisa foram capazes de quantificar a porcentagem de ruptura na região de colagem após os testes de cisalhamento nas linhas de cola de elementos de MLC.

As porcentagens de ruptura na região de colagem dos elementos de MLC obtidas por meio do *software GLT Rupture Analysis* diferiram estatisticamente e numericamente daquelas obtidas pelo *ImageJ* e pela malha quadriculada. Essa diferença foi de aproximadamente 8% superior e essa diferença pode estar no fato do *software GLT* ser um *software* relativamente novo e estar ainda em desenvolvimento.

A precisão dos resultados obtidos pelo *ImageJ* pode ser melhorada com a utilização de imagens escaneadas ao invés de análise de fotografias, porém dessa forma o processo de analisar as imagens torna-se mais demorado.

A porcentagem média obtida para a ruptura no adesivo a partir do *ImageJ* foi a que se aproximou mais daquela obtida por meio da malha quadriculada, porém é importante lembrar que a quantificação visual, apesar de servir como um dos parâmetros de comparação, é subjetiva e sujeita a imprecisões.

O coeficiente de variação é uma medida muito importante na estatística, interpretação de dados e controle de qualidade, os conjuntos de dados apresentaram coeficientes superiores a 30%, o que indica um grupo de dados heterogêneo. Contudo, os resultados obtidos através do *ImageJ* obtiveram o menor coeficiente e, conseqüentemente, uma menor variabilidade.

Em relação a qualidade da colagem, pode-se concluir que a adesão não alcançou um nível satisfatório, já que apresentou falhas na madeira em torno de 54 a 57% e o restante foi no adesivo. A presença de resinas e nós na madeira de pinus podem interferir na adesão entre as superfícies a serem coladas, criando barreiras que dificultam a ligação eficaz entre as lamelas.

Também é importante se atentar ao armazenamento do adesivo, pois estes são sensíveis à exposição a condições inadequadas de armazenamento, como temperatura e umidade inadequadas. A exposição a condições desfavoráveis de armazenamento pode levar à degradação do adesivo, o que resultaria em uma ligação de baixa qualidade.

Estudos complementares são ainda necessários para tirar conclusões definitivas a respeito dos desempenhos de ambos os *softwares*, sobretudo acerca do uso de imagens escaneadas e a sua influência na precisão do *software ImageJ*.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, N. d. *et al.* Estudo da reatividade de taninos de folhas e cascas de barbatimão *stryphnodendron adstringens* (mart.) coville. **Scientia Forestalis**, [s.l.], v. 38, n. 87, p. 401–408, 2010.
- ALMEIDA, V. C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo uréia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2022. 81 p.
- AZAMBUJA, M. dos A. *et al.* Proposta de normalização para madeira laminada colada (mlc). **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 5, n. 13, 2013.
- BIANCHE, J. J. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. 98 f. Tese (Doutorado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- 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**. Guaratinguetá: Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, 2020.
- BURDURLU, E. *et al.* The effect on shear strength of different surfacing techniques in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) bonded joints. **Journal Of Adhesion Science And Technology**, [s.l.], v. 21, n. 3-4, p. 319-330, jan. 2007.
- CALIL NETO, C. Madeira laminada colada. **Revista da Madeira**, Curitiba, v.21, n.124, p. 14-16, jul. 2010. Disponível em: https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1473&subject=MLC&title=A%20madeira%20laminada%20colada. Acesso em: 04 out. 2022.
- CALIL NETO, Ca. **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. doi:10.11606/D.88.2011.tde-19042011-171909. Acesso em: 23 set. 2023.
- CALLEJAS OLMOS, M. A. **Equipamento e processo de fabricação de chapas aglomeradas a partir de resíduos de madeira**. 1992. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000735915>. Acesso em: 10 set. 2023.

CARLO, U. D. **Arquitetura sustentável e baixo impacto ambiental**. São Paulo: Universidade de Guarulhos, 1998.

CAVALHEIRO, R. S. **Madeira laminada colada de Schizolobium amazonicum Herb. (Paricá): combinação adesivo/tratamento preservante**. 2014. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-07102014-143850/pt-br.php>. Acesso em: 14 set. 2023.

CERCHIARI, A. M. F. **Aprimoramento do poliuretano a base de óleo de mamona na manufatura de Madeira Laminada Colada (MLC) de Cupressus lusitanica, Corymbia maculata e Hevea brasiliensis**. 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

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.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de madeira**. Uberlândia: UFU, 2003.

GRANATO, A. F. **Aspectos tecnológicos da fabricação de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2011. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

ICIMOTO, F. H. **Dormentes em madeira laminada colada de Pinus oocarpa**. 2013. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2021**. 2021. Disponível em: https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021compactado.pdf?utm_source=akna&utm_medium=email&utm_campaign=lba-lanca-RelatorioAnual-2021. Acesso em: 24 out. 2022.

ISSA, C. A.; KMEID, Z. Advanced wood engineering: glulam beams. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 19, n. 2, p. 99-106, mar. 2005.

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.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 16, p. [3]-29, set. 2002.

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.

MOODY, R. C.; LIU, J. Y. **Glued structural members**. In: WOOD handbook: wood as na engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113, cap. 11, p. 11.1-11.24.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. da S.; ALVES, R. C. Influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de eucalipto. **Construindo**, [s.l.], v. 05, n. 01, jan./jun. 2013.

NOGUEIRA, R. de S. **Proposta de um método de ensaio para o controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e LVL**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22062017-102209/pt-br.php>.

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

PÁSCHOA, D. P. **Avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC confeccionados com madeiras de eucalipto e resina fenólica**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de Itapeva, Itapeva- SP, 2018.

PEDRESCHI, R.; GOMES, F. C.; MENDES, L. M. Avaliação do desempenho da madeira na habitação utilizando abordagens de sistemas. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 283–293, 2005.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a Norma Brasileira NBR 7190/97 e critérios das Normas Norte-americana NDS e Européia EUROCODE 5**. 6. ed., rev. atual. e ampl., Rio de Janeiro: LTC, 2003. Disponível em: [https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2810-1/epubcfi/6/8\[%3Bvnd.vst.idref%3Dtitle\]!/4/2/4%4051:42](https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2810-1/epubcfi/6/8[%3Bvnd.vst.idref%3Dtitle]!/4/2/4%4051:42). Acesso em: 12 set. 2022

PLASTER, O. B. *et al.* Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de Eucalyptus sp. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, 2008.

RODRIGUES, R. A. D. **Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para a construção civil**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

SEGUNDINHO, P. G. de A. *et al.* Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 441-449, set. 2013.

SEGUNDINHO, P. G. d. A. *et al.* Eficiência da colagem de madeira tratada de eucalyptus cloeziana f. muell para produção de madeira laminada colada (mlc). **Revista Matéria**, Rio De Janeiro. V. 22, n.2, 2017.

SERENINE JUNIOR, L. *et al.* Qualidade da madeira juvenil de um híbrido clonal (*Eucalyptus grandis* x *eucalyptus urophylla*-h13). **Advances in Forestry Science**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 523–527, 2019.

SERPA, P. N. *et al.* Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG. v. 27, n.5, p. 723-733, 2003.

SERRANO, E. Mechanical performance and modelling of glulam. *In*: THELANDERSSON, Sven; LARSEN, Hans Jörgen (ed.). **Timber engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. p. 67 – 80. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Timber+Engineering-p-9780470844694>.

SERRANO, L. J. P. **Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden e seus impactos na mecânica de vigas laminadas coladas**. 2013. Tese (Doutorado) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz, Piracicaba, 2013.

SOUZA, A. J. D. d. **Proposição de um novo método de medição do desgaste em ferramentas de corte empregadas em operações de fresamento da madeira**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais.) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. 2010. **Wood-based composite materials: panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials**. *In*: WOOD handbook: wood as an engineering material. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. General technical report FPL; GTR-190. cap11, p.1- 28.

VICK, C. B. **Adhesive bonding of wood materials**. *In*: WOOD handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113. cap.9, p. 1-24.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-26052006-150001/en.php>.

APÊNDICE A – Resultados das porcentagens de ruptura no adesivo dos corpos de prova de MLC

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados das porcentagens de ruptura no adesivo dos corpos de prova de MLC, feitos após a realização dos ensaios de cisalhamento das linhas de cola, obtidos através dos dois *softwares* e pela malha quadriculada.

Tabela 5 - Porcentagem de adesivo na região de ruptura – viga 1 de MLC

Vigas de MLC	Corpos de prova	Linha de cola	% de Ruptura no adesivo (malha quadriculada)	% de Ruptura no adesivo (ImageJ)	% de Ruptura no adesivo (GLT Rupture Analysis)
1	1	1	67	65	52
		2	35	37	41
		3	32	33	39
		4	52	52	56
	2	1	72	69	57
		2	43	46	47
		3	45	49	52
		4	73	75	79
	3	1	59	56	58
		2	32	35	37
		3	44	42	43
		4	49	47	54
	4	1	47	44	52
		2	57	54	59
		3	37	39	63
		4	68	66	74
	5	1	42	45	36
		2	24	21	19
		3	18	21	38
		4	48	49	37
		1	22	18	49

6	2	36	33	37
	3	47	49	49
	4	63	65	64
7	1	59	57	63
	2	47	52	49
	3	45	48	47
	4	41	43	40
8	1	54	53	57
	2	48	46	52
	3	27	30	25
	4	57	55	62
9	1	43	41	47
	2	44	46	41
	3	41	43	47
	4	49	52	52
10	1	37	35	41
	2	54	57	57
	3	56	57	60
	4	60	58	62
11	1	24	26	22
	2	34	37	35
	3	46	49	49
	4	33	37	26
12	1	31	37	30
	2	34	39	37
	3	44	45	40
	4	29	46	33
13	1	0	3	5
	2	25	26	27
	3	27	31	23
	4	33	44	38
	1	1	1	3
	2	21	26	22

	14	3	30	34	33
		4	51	49	50
	15	1	53	50	55
		2	13	11	20
		3	28	27	28
		4	55	49	56
	16	1	63	53	61
		2	3	2	5
		3	46	44	45
		4	33	35	38

Tabela 6 - Porcentagem de adesivo na região de ruptura – viga 2 de MLC

Vigas de MLC	Corpo de prova	Linha de cola	% de Ruptura no adesivo (malha quadriculada)	% de Ruptura no adesivo (ImageJ)	% de Ruptura no adesivo (GLT Rupture Analysis)
2	1	1	64	58	65
		2	62	63	69
		3	50	51	59
		4	70	67	69
	2	1	44	43	49
		2	56	58	52
		3	57	55	56
		4	29	31	32
	3	1	49	50	55
		2	48	47	50
		3	45	48	50
		4	39	42	46
	4	1	68	61	75
		2	51	50	68
		3	44	46	48
		4	63	59	62
		1	49	52	56

5	2	42	45	44
	3	36	41	37
	4	44	45	45
6	1	67	69	72
	2	44	42	45
	3	55	55	57
	4	29	32	31
7	1	74	74	76
	2	36	39	34
	3	41	44	38
	4	37	33	54
8	1	30	39	35
	2	19	15	17
	3	47	44	53
	4	57	49	55
9	1	52	51	45
	2	35	27	36
	3	62	51	65
	4	56	54	71
10	1	41	38	46
	2	17	11	14
	3	19	18	25
	4	48	46	59
11	1	10	8	14
	2	31	35	22
	3	34	37	35
	4	38	30	45
12	1	9	6	11
	2	56	55	62
	3	34	36	37
	4	51	52	50

Tabela 7 - Porcentagem de adesivo na região de ruptura – viga 3 de MLC

Vigas de MLC	Corpo de prova	Linha de cola	% de Ruptura no adesivo (malha quadriculada)	% de Ruptura no adesivo (ImageJ)	% de Ruptura no adesivo (GLT Rupture Analysis)
3	1	1	45	50	42
		2	52	48	79
		3	54	52	63
		4	34	37	50
	2	1	60	64	61
		2	49	44	57
		3	46	44	52
		4	41	38	54
	3	1	43	49	45
		2	31	28	35
		3	30	33	35
		4	35	34	41
	4	1	47	49	52
		2	44	37	50
		3	32	34	36
		4	15	19	17
	5	1	27	26	29
		2	43	40	47
		3	18	20	22
		4	30	32	33
	6	1	32	36	34
		2	31	35	35
		3	27	28	31
		4	7	9	11
	7	1	42	38	47
		2	43	41	44
		3	44	45	48
		4	28	32	29
		1	71	66	70

8	2	63	54	60
	3	69	65	70
	4	24	26	28
9	1	61	56	67
	2	44	37	49
	3	46	39	58
	4	51	45	55
10	1	41	43	52
	2	53	41	51
	3	54	53	60
	4	48	50	52
11	1	39	37	42
	2	46	41	44
	3	47	48	52
	4	61	63	65
12	1	54	56	57
	2	40	42	43
	3	46	48	52
	4	41	42	42
13	1	46	45	46
	2	47	49	49
	3	35	31	18
	4	43	44	45
14	1	50	51	50
	2	54	48	60
	3	27	27	28
	4	51	47	55
15	1	53	55	58
	2	41	47	44
	3	52	55	55
	4	42	43	45
16	1	53	56	55
	2	40	43	44
	3	55	52	60
	4	53	55	58