



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

DOUGLAS PONTES PÁSCHOA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE COLAGEM
DE ELEMENTOS DE MLC CONFECCIONADOS
COM MADEIRAS DE EUCALIPTO E RESINA
FENÓLICA**

Itapeva - SP

2018

DOUGLAS PONTES PÁSCHOA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE COLAGEM DE
ELEMENTOS DE MLC CONFECCIONADOS COM
MADEIRAS DE EUCALIPTO E RESINA FENÓLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Experimental de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Itapeva - SP

2018

P279a Páschoa, Douglas Pontes
Avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC
confeccionados com madeiras de eucalipto e resina fenólica /
Douglas Pontes Páschoa. -- Itapeva, 2018
61 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Câmpus Experimental de Itapeva, Itapeva
Orientador: Julio Cesar Molina

1. Delaminação da linha de cola. 2. Cisalhamento da linha de
cola. 3. Madeira Laminada Colada. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Câmpus Experimental de Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



DOUGLAS PONTES PASCHOA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE COLAGEM DE ELEMENTOS DE
MLC CONFECCIONADOS COM MADEIRAS DE EUCALIPTO E
RESINA FENÓLICA**

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

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

2º Examinador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

3º Examinador: Prof. Dr. Bruno Santos Ferreira
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

Itapeva, 26 de novembro de 2018.

Agradecimentos

Obrigado, meu Deus! À minha família e amigos que contribuíram cada um da sua maneira. Aos colegas Natália Bianchi e Vitor Andrade, por me ajudarem na parte prática do presente trabalho. À todos os funcionários da UNESP, principalmente, aos professores Alexandre Jorge Duarte de Souza, Carlos Alberto Oliveira de Matos e ao técnico Juliano Rodrigo de Brito que foram fundamentais para a realização deste trabalho. E especialmente ao meu orientador Julio Cesar Molina pela oportunidade e conhecimentos transmitidos. Por fim, a UNESP, devido as excelentes instalações para o desenvolvimento deste trabalho.

“Evita cair no desalento, face à insinuação falsa. O trabalho é dom da vida, que dignifica e mantém o homem. Em toda parte o trabalho se impõe como lei mantenedora do equilíbrio. Sem ele tudo retornaria ao caos do princípio, e os objetivos superiores naufragariam no tédio e na ociosidade doentios. Busca, portanto, motivação para fazeres bem o teu trabalho, renovando- te nele e nele colocando os teus melhores empenhos, de modo a te enriqueceres de justa gratificação emocional em relação ao teu maravilhoso meio de ganhar com nobreza o pão diário.”

FRANCO, Divaldo Pereira. Episódios Diários. Pelo Espírito Joanna de Ângelis. LEAL.
Capítulo 5.

Resumo

Para aumentar as soluções em madeira, o país tem adotado novas técnicas de construção, as quais utilizam subprodutos da madeira, dentre eles podem ser citados a Madeira Laminada Colada (MLC). O presente trabalho consistiu em avaliar o projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 proposto, colocando em prática os elementos de madeira laminada colada no que se refere aos ensaios de resistência ao cisalhamento e delaminação da linha de cola para madeira de Eucalipto, obtida por meio de reflorestamento da região de Itapeva-SP. Na caracterização mecânica da madeira, as mesmas foram submetidas a ensaios de compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e flexão estática. A confecção da madeira laminada colada foi realizada através da aplicação da resina resorcinol formaldeído à colagem das lamelas de madeira. Todas elas foram classificadas de forma mecânica e visual. Foram realizados os ensaios, avaliando assim, a qualidade de colagem da resina à madeira. Na delaminação da linha de cola utilizou-se uma autoclave, construída especificamente para esse ensaio. Os outros ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios (EMIC) com capacidade para 300kN, disponível no Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP de Itapeva-SP. A colagem das lamelas não foi satisfatória, apresentando porcentagens máximas de delaminação da linha de cola de 71,40%. As médias das resistências ao cisalhamento das linhas de cola - considerando o mesmo elemento de MLC - não apresentaram diferenças significativas entre si.

Palavras-chave: Delaminação da linha de cola. Cisalhamento da linha de cola. Madeira Laminada Colada.

Abstract

To increase the wood solutions, the country has adopted new construction techniques, which use wood by-products, among which can be cited Laminated Wood (MLC). The present work consisted in evaluating the proposed standard ABNT NBR PN 02: 126.10-001-5, putting in practice the glued laminated wood elements with respect to the tests of shear strength and delamination of the glue line for wood of Eucalyptus, obtained by means of reforestation of the region of Itapeva-SP. In the mechanical characterization of the wood, they were subjected to compression tests parallel to the fibers, parallel shear to the fibers and static bending. The confection of glued laminated wood was accomplished through the application of the resorcinol formaldehyde resin to the glueing of the lamellae of wood. All of them were classified mechanically and visually. The tests were carried out, evaluating the quality of bonding of the resin to the wood. In the delamination of the glue line an autoclave was constructed, built specifically for this test. The other tests were performed in the universal test machine (EMIC) with a capacity of 300 kN, available at the Material Properties Laboratory of UNESP of Itapeva-SP. Glue bonding was not satisfactory, with maximum percentages of glue line delamination of 71.40 %. The average shear strength of the glue lines - considering the same MLC element - did not show significant differences between them.

Keywords: Delamination of the glue line. Shearing of the glue line. Laminated Wood.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Composição do elemento de MLC	26
Figura 2 – Dimensões em centímetros do corpo-de-prova para determinação da umidade e densidade básica	29
Figura 3 – Dimensões em centímetros do corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	30
Figura 4 – Dimensões do corpo-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras	31
Figura 5 – Medição de um nó	32
Figura 6 – Medição de um conjunto de nós	32
Figura 7 – Medição de nós com ocorrência de dois deles na mesma seção transversal	32
Figura 8 – Medição da inclinação das fibras	33
Figura 9 – Medição do comprimento de fissuras: a) e b) racha; c) fissura não passante; d) fissura passante (fendilhado de topo)	33
Figura 10 – Medição do encurvamento	34
Figura 11 – Medição do encanoamento	34
Figura 12 – Medição do arqueamento	34
Figura 13 – Medição do torcimento	35
Figura 14 – Medição do comprimento do esmoado	35
Figura 15 – Corpo-de-prova para ensaio de delaminação da linha de cola	36
Figura 16 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento da linha de cola	37
Figura 17 – Lamelas secas até 12% de umidade	40
Figura 18 – Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	40
Figura 19 – Ensaio de compressão paralela às fibras	41
Figura 20 – Ensaio de flexão estática não-destrutiva	41
Figura 21 – Aplicação do adesivo nas lamelas	42
Figura 22 – Prensagem das vigas	42
Figura 23 – Resultado da colagem	43
Figura 24 – Autoclave construída para os ensaios de delaminação	44
Figura 25 – Corpos de prova na autoclave	44
Figura 26 – Corpos de prova durante o processo de secagem	45
Figura 27 – Corpos de prova de cisalhamento da linha de cola do elemento 1 de MLC	45
Figura 28 – Dispositivo para os ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola	46
Figura 29 – Resultado do ensaio de delaminação	50

Figura 30 – Resultado da análise estatística para a delaminação da linha de cola	51
Figura 31 – Resultado da análise estatística para o cisalhamento da linha de cola	54

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 1 de MLC . . .	47
Tabela 2 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 2 de MLC . . .	47
Tabela 3 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 3 de MLC . . .	47
Tabela 4 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 4 de MLC . . .	48
Tabela 5 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 5 de MLC . . .	48
Tabela 6 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 6 de MLC . . .	48
Tabela 7 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 1 de MLC . .	49
Tabela 8 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 2 de MLC . .	49
Tabela 9 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 3 de MLC . .	49
Tabela 10 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 4 de MLC . .	49
Tabela 11 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 5 de MLC . .	50
Tabela 12 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 6 de MLC . .	50
Tabela 13 – Primeira análise estatística (Test t): diferenças entre torques	51
Tabela 14 – Segunda análise estatística (Test t): diferenças entre a porcentagem de delaminação da linha de cola resultante com a máxima delamina- ção da linha de cola de 6%	51
Tabela 15 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 1 de MLC . .	52
Tabela 16 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 2 de MLC . .	52
Tabela 17 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 3 de MLC . .	52
Tabela 18 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 4 de MLC . .	53
Tabela 19 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 5 de MLC . .	53
Tabela 20 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 6 de MLC . .	53
Tabela 21 – Análise estatística (ANOVA): Causa das variações de cisalhamento da linha de cola	53

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MLC	Madeira Laminada Colada
NBR	Norma Brasileira
PN	Projeto de Norma

Sumário

	Introdução	19
1	OBJETIVO GERAL	21
1.1	Objetivos Específicos	21
2	REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1	Madeira	23
2.2	Madeira de Eucalipto	23
2.3	Adesivo Fenólico	24
2.4	Madeira Laminada Colada (MLC)	25
2.4.1	Definições	25
2.4.2	Vantagens e desvantagens da MLC	26
2.4.3	Processo produtivo da MLC	26
2.5	Controle de Qualidade	28
2.6	Caracterização mecânica da madeira	29
2.6.1	Determinação da umidade e densidade	29
2.6.2	Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	30
2.6.3	Ensaio de compressão paralela às fibras	30
2.6.4	Ensaio de flexão estática	31
2.7	Classificação visual da madeira	31
2.7.1	Nós	32
2.7.2	Inclinação das fibras	33
2.7.3	Fissuras	33
2.7.4	Encurvamento	34
2.7.5	Encanoamento	34
2.7.6	Arqueamento	34
2.7.7	Torcimento	35
2.7.8	Esmoadado	35
2.8	Teste de qualidade de colagem de elementos estruturais de MLC	35
2.8.1	Ensaio de delaminação da linha de cola	36
2.8.2	Ensaio de cisalhamento da linha de cola	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Produção dos elementos de MLC	39
3.1.1	Umidade	39
3.1.2	Classificação mecânica das lamelas	40

3.1.3	Classificação visual das lamelas	41
3.1.4	Colagem e prensagem das vigas	42
3.2	Teste de qualidade de colagem de elementos estruturais de MLC	43
3.2.1	Ensaio de delaminação da linha de cola	43
3.2.2	Ensaio de cisalhamento para cada linha de cola	45
3.3	Análise estatística	46
4	RESULTADOS	47
4.1	Caracterização das lamelas	47
4.2	Ensaio de delaminação da linha de cola	48
4.3	Ensaio de cisalhamento da linha de cola	52
5	CONCLUSÃO	57
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	57
	REFERÊNCIAS	59

Introdução

Durante décadas, o baixo consumo de subprodutos de madeira industrializada no Brasil esteve ligado a questões culturais. Para aumentar as soluções em madeira, o país tem adotado novas técnicas de construção, dentre eles podem ser citados a Madeira Laminada Colada (MLC), além de outros produtos industrializados.

Para a MLC, é necessário um controle de qualidade na produção desses elementos. Esse controle de qualidade, nos países com tradição na utilização estrutural da madeira, é feito com base em recomendações normativas próprias. O Brasil, infelizmente ainda não possui uma normalização própria para a avaliação da qualidade de tais produtos. Dentro deste contexto, vale dizer que as recomendações de cálculo e os ensaios realizados hoje no país para MLC são baseados em normas estrangeiras.

No entanto, atualmente, está em fase de desenvolvimento no Brasil, os projetos de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 (Madeira Laminada Estrutural: Método de Ensaio) e ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3 (Ensaio de Caracterização de Peças Estruturais de Madeira), baseados nos procedimentos de normas europeias: EN 14080:2013 e EN 408:2010, e na norma ISO 13910:2013, respectivamente.

O primeiro projeto de norma tem como principal objetivo atender as indústrias nacionais produtoras de MLC para avaliar a qualidade final do produto, enquanto que, a segunda, pode ser aplicada para determinação da resistência e rigidez de vigas de MLC com dimensões estruturais. Vale mencionar também que os métodos apresentados na versão de 1997 da norma brasileira de madeiras, para a avaliação de elementos de MLC, são bastante simplificados e necessitam de melhorias e adaptações para uma adequada avaliação da qualidade desses elementos. Além disso, não existe nenhuma diferenciação para adesivos usados em ambientes internos ou externos, neste caso.

Alguns testes realizados no Brasil por [CALIL NETO \(2011\)](#) e [CALIL NETO et al. \(2017\)](#) consideraram o método proposto pela norma canadense CSA: 112.9:2004 e pelas normas T107 e T110 (AITC, 2004). Os resultados obtidos, nestes trabalhos, mostram a consideração de um longo tempo para a realização dos ensaios e, conseqüente inviável para a realidade brasileira.

Portanto, este trabalho teve a finalidade de avaliar a eficiência e resposta do método de ensaio proposto no projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-5, que é associado ao projeto de revisão da norma brasileira [ABNT 7190 \(1997\)](#). Neste caso, propõe-se um estudo para a avaliação da delaminação em peças de MLC confeccionadas com madeiras de reflorestamento coladas com adesivo estrutural, como também um estudo da resistência ao cisalhamento da linha de cola dos elementos de

MLC confeccionado.

Espera-se que os resultados aqui obtidos possam contribuir para o processo de revisão da [ABNT 7190 \(1997\)](#), bem como para a maior utilização da MLC no Brasil. Além disso, o tema “qualidade de colagem de elementos de MLC” é de grande interesse nos meios técnico e científico brasileiro e a literatura nacional sobre esse tema, atualmente, encontra-se em fase de desenvolvimento no país.

1 Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente a qualidade de colagem de elementos de MLC confeccionados com madeiras de reflorestamento de eucalipto da região de Itapeva – SP e colados com resina fenólica.

1.1 Objetivos Específicos

- Teste dos equipamentos de ensaio confeccionados exclusivamente para o desenvolvimento deste projeto (autoclave para ensaio de delaminação da linha de cola e dispositivo para ensaio de cisalhamento da linha de cola);
- Avaliação da porcentagem de delaminação da linha de cola de amostras padronizadas retiradas dos elementos estruturais de MLC confeccionados para tal finalidade;
- Avaliação da resistência ao cisalhamento de todas as linhas de colas que compõem as amostras ensaiadas das vigas de MLC;
- Analisar os resultados com base em especificações normativas e trabalhos recentes correlatos encontrados na literatura.

2 Revisão de Literatura

2.1 Madeira

A madeira é originária de um sistema biológico complexo, tornando-se um material de extrema variabilidade. Sua ultra-estrutura e composição química, bem como suas propriedades físicas e mecânicas, variam significativamente entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e, mesmo, entre diferentes partes de uma mesma árvore (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

Segundo Gonçalves (2000) podem ser classificadas de acordo com o grupo dos vegetais em duas categorias, Gimnospermas e Angiospermas. As Gimnospermas, principalmente as coníferas, são consideradas resinosas, não porosas (ausência de poros) ou “softwoods”. As Angiospermas, principalmente as dicotiledôneas, são denominadas folhosas, porosas ou “hardwood”.

Segundo Carvalho et al. (2008) a anatomia da madeira pode ser descrita observando três seções ou superfícies de corte, sendo elas: seção transversal, seção tangencial e seção radial, configurando um caráter anisotrópico da mesma, o que significa que suas propriedades mecânicas variam conforme a direção da mesma.

Quando cortado transversalmente, o tronco de uma árvore apresenta um desenho de círculos concêntricos, os quais são chamados de anéis de crescimento ou anéis anuais. Quando se trata de um clima temperado, um anel anual típico apresenta duas faixas distintas, denominadas lenho inicial ou primavera, o qual é mais largo e brando; e lenho tardio, considerado mais compacto e mais rijo (GONZAGA, 2006).

A madeira possui diversas características sustentáveis que se tornam atrativos e se destacam no ramo da construção civil, como o fato da mesma ser reciclável, biodegradável, renovável e por despendar menor quantidade de energia na sua transformação em comparação com demais materiais utilizados na construção civil (MARQUES et al., 2008).

2.2 Madeira de Eucalipto

Na década de 1960 a implantação das áreas de reflorestamento ganhou grande impulso, devido ao programa governamental de incentivos fiscais. Para suprir a algumas necessidades particulares de utilização, o Brasil optou pela plantação de duas principais espécies, o Pinus e o Eucalyptus (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

O gênero *Eucalyptus* é conhecido por sua grande variabilidade genética. São centenas de espécies com propriedades físicas e químicas tão diversas que fazem com que os eucaliptos sejam usados para as mais diversas finalidades. Mesmo dentro de uma mesma espécie, propriedades podem variar marcadamente, fazendo com que determinadas progênies ou procedências sejam apropriadas para um determinado processo industrial e que outras sejam totalmente inúteis (PEREIRA et al., 2000).

A madeira de eucalipto tem-se prestado a uma série de finalidades. Além dos usos tradicionais, como lenha, estacas, moirões, dormentes, carvão vegetal, celulose e papel, chapas de fibras e de partículas, há uma forte tendência em utilizá-la, também, para usos mais nobres, como fabricação de casas, móveis e estruturas, especialmente nas regiões Sudeste e Sul, carentes de florestas naturais (PEREIRA et al., 2000).

Segundo Hillis e Brown (1978 apud OLIVEIRA; SILVA, 2003) a madeira proveniente de árvores do gênero *Eucalyptus*, de rápido crescimento, apresenta uma contração excessiva ocasiona defeitos de secagem, como empenamentos e fendilhamentos, que tendem a ser piores em madeiras de menor densidade.

As variações da densidade dependem das mudanças na proporção dos vasos e das espessuras das paredes celulares das fibras. O crescimento da densidade pode ser o resultado do aumento da espessura da parede celular das fibras ou de um aumento na proporção das fibras em relação, por exemplo, à proporção de vasos. De maneira inversa, um aumento na proporção de vasos, com ou sem decréscimo na espessura da parede celular, leva à redução na densidade (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

A espécie não tolera temperaturas elevadas, nem condições de seca pronunciadas. No Brasil, as regiões onde se desenvolvem melhor estão localizadas nos Estados do Rio Grande do Sul, Minas Gerais e São Paulo (GONZAGA, 1983 apud TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

2.3 Adesivo Fenólico

O uso de adesivos pelo homem remonta a mais de 300 anos antes de Cristo. Há informações de que os egípcios utilizavam a goma arábica de essências florestais como a acácia e de resinas de outras árvores, assim como do ovo e da borracha. Empregado uma cola feita com pasta de farinha, confeccionaram os primeiros papiros compostos de lâminas finas, justapostas e coladas (LAURIE, 1910 apud JESUS, 2000)

Na década de 30 foi empregada, com uso em escala industrial na madeira, a primeira resina sintética com base no fenol-formaldeído, apesar de ter sido desenvolvido 65 anos antes por Baekland (SKEIST, 1962 apud JESUS, 2000).

Os adesivos de fenol-formaldeído são formados a partir de resinas fenólicas,

primeiras a serem empregadas com aplicação comercial em madeiras. Necessitam de altas temperaturas para cura (130 a 160°C), sendo comercializadas em filmes secos, reconstituídas pela ação da água. Precisam de um endurecedor a ser dosado com a resina, produzindo boa resistência das uniões mesmo que atuem sob ação de condições extremamente adversas. Estas condições podem ser: longo tempo de exposição à água quente ou fria, ciclos de secagem e de endurecimento, variações extremas de temperatura e umidade relativa, temperaturas em torno da temperatura de carbonização da madeira, ataque de micro-organismos e exposição a ação de vários tipos de componentes, como aqueles usados na preservação de madeiras, os óleos e álcalis (KOLLMANN; COTE, 1975).

Se os processo de colagem e endurecimento forem adequadamente conduzidos, as colagens feitas com adesivos fenólicos apresentarão grande durabilidade, podendo ultrapassar a da própria madeira. Sua linha de cola possui coloração escura e um dos fatores negativos é o alto custo do fenol, cuja matéria prima é o petróleo (JESUS, 2000).

2.4 Madeira Laminada Colada (MLC)

2.4.1 Definições

A crescente necessidade de utilizar elementos estruturais de qualidade, juntamente com o marcante avanço na tecnologia dos adesivos e o excelente potencial madeireiro gerado pelas espécies de reflorestamento, contribuíram para o surgimento de um novo material de construção, a Madeira Laminada Colada (MLC). Este material tornou-se um dos mais importantes elementos para a aplicação estrutural, sendo utilizado com muito sucesso em várias partes do mundo, nas mais variadas formas e dimensões (MACEDO; JUNIOR, 1999).

Conhecida mundialmente por *glued lumber timber* ou apenas *glulam*, a madeira laminada colada (MLC) foi utilizada pela primeira vez em Basel, na Suíça, no ano de 1893, para a construção de um auditório, esta técnica de colagem ficou conhecida como *Hertzer System*. Nesta época grande parte das aplicações ficou limitada às condições de uso protegidas da umidade. Após a Segunda Guerra Mundial, com o desenvolvimento de adesivos a base de cola, a MLC ganhou espaço e foi aplicada no uso de estruturas expostas a umidade (MIOTTO, 2009).

Sua composição é obtida por peças de madeira coladas, de pequeno comprimento e seção, associadas de tal forma que suas fibras ficam dispostas paralelamente ao comprimento da peça a ser fabricada (JESUS, 2000). As lâminas são obtidas através da emenda longitudinal das tábuas, podem ser coladas face a face e borda a borda

para se obter a altura e largura desejada, podem também ser arqueadas para se obter a forma curva durante a colagem ([MACÊDO, 1996](#)).

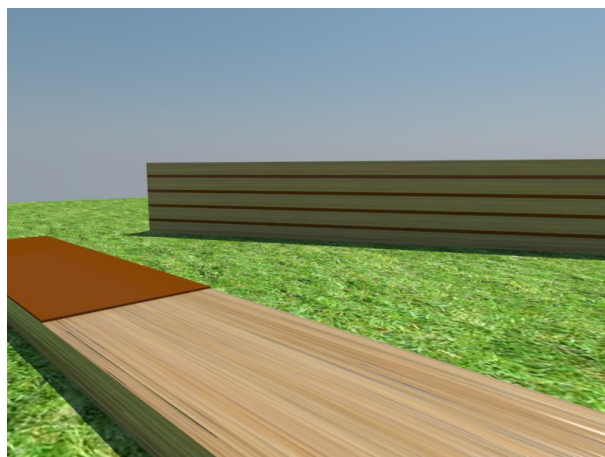


Figura 1 – Composição do elemento de MLC Fonte: Autor

2.4.2 Vantagens e desvantagens da MLC

Como algumas vantagens da MLC em relação às estruturas de madeira maciça podem ser citadas: a possibilidade na construção de grandes estruturas, a partir de peças comerciais, com dimensões reduzidas; produção de elementos estruturais com secção e comprimento, forma e dimensões quaisquer, a partir de tábuas curtas e pouco largas, restritas apenas a área onde serão fabricadas e às condições de transporte; redução considerável de rachaduras e outros defeitos, como os nós, típicos da madeira de grandes dimensões; e, quando do processo de fabricação, podem ser dadas contra-flechas aos elementos com finalidade de se aumentar a sua eficiência estrutural. Como desvantagem principal tem-se: o custo da MLC ainda é mais elevado; se comparado com o da madeira maciça uma vez que o processo de produção é industrializado e são empregados adesivos de alto custo; mão de obra especializada; além de técnicas e equipamentos especiais ([JESUS, 2000](#)).

2.4.3 Processo produtivo da MLC

A produção da MLC ocorre dentro da indústria, onde a madeira serrada passa por diversos processos até a obtenção do produto final ([GOMES, 2018](#)). As etapas são divididas em:

- Classificação visual e mecânica das lamelas e separação das mesmas em lotes;
- Secagem em estufa;
- Execução de emendas dentadas através de fresamento e colagem;

- Corte das lamelas na dimensão do projeto;
- Aplicação do adesivo nas faces das lamelas;
- Colagem e prensagem das lamelas;
- Corte das vigas de acordo com a dimensão do projeto;
- Teste de resistência e linha de cola;
- Acabamento.

As lamelas de madeira que irão compor o elemento de MLC devem ser classificadas de maneira visual e mecânica. Após a classificação, as lâminas que apresentam as melhores características devem ser posicionadas nas regiões que exigem maior resistência mecânica, ou seja, nas regiões solicitadas por esforços de compressão, na parte superior do elemento, e tração, na parte inferior do elemento (FIORELLI, 2005).

A etapa de secagem é, na maioria das vezes, realizada nas lâminas de maneira artificial, utilizando estufas de secagem. A remoção da umidade da madeira ocorre até a obtenção da umidade final desejada para a lâmina. No caso de lâminas para produção de MLC essa umidade não deve ser superior a 15% (CERCHIARI, 2013).

A etapa de execução das emendas nas peças de MLC permite a obtenção de elevado comprimento dos elementos estruturais, além de possibilitar a remoção de defeitos em pequenas seções das peças e utilização da mesma na estrutura. A emenda dentada *finger joint* é a mais utilizada no processo de fabricação de MLC. São utilizadas também, mas com menor frequência, as emendas de topo e biselada (APRILANTI, 2010).

Portanto, após o processo de emenda, corte no comprimento previsto em projeto e aplainamento, as lâminas estão aptas para a aplicação do adesivo em suas superfícies. Para este processo, podem ser utilizados diversos adesivos estruturais, sendo os adesivos a base de fenol-formaldeído e resorcinol-formaldeído, os adesivos mais utilizados para a produção de MLC (CERCHIARI, 2013).

Após a aplicação do adesivo, a viga deve ser submetida a prensagem para fixação e cura completa do adesivo. A pressão e o tempo de prensagem variam de acordo com o adesivo utilizado e, portanto, este processo deve ocorrer de acordo com o especificado pelo fabricante do adesivo (FIORELLI, 2005 apud CERCHIARI, 2013).

Após a prensagem, as peças passam pelo processo de acabamento e obtenção das dimensões finais. O aplainamento após prensagem, permite a remoção do excesso de adesivo nas laterais das lâminas. Após o aplainamento são realizados os cortes finais e acabamentos necessários (MIOTTO, 2009).

2.5 Controle de Qualidade

Os estudos sobre o produto MLC estão sendo constantemente aprimorados no Brasil, de forma a encontrar diferentes soluções de produção e avaliação da qualidade e resistência dos elementos. Não existem muitos estudos no Brasil envolvendo análise numérica de elementos de madeira, sendo que, a maioria dos estudos são baseados em análises experimentais (GOMES, 2018).

Quando se fala de MLC é importante destacar que esse tipo de beneficiamento da madeira é ainda muito caro e específico. O mercado consumidor desse tipo de material é muito restrito. O desenvolvimento da tecnologia de produção e manutenção é primordial sim para produzir MLC de qualidade, mas muito além disso, tornar esse ramo da indústria mais econômico e consequentemente mais acessível e lucrativo.

A Madeira Laminada Colada poderia ser padronizada, fabricada em série e comercializada em maiores proporções. Por isso, faz-se necessário que estudos comparativos com as principais madeiras utilizadas com fins estruturais sejam realizados, principalmente quando produzida com madeiras oriundas de reflorestamento, a baixo custo e com a melhor configuração para sua utilização (SANTOS, 2014).

Vale ressaltar que a produção em série pode reduzir os custos, além da possibilidade de suprimento da madeira serrada que é um recurso cada vez mais escasso do mercado (SANTOS, 2014).

Por último, a criação de meios de acesso e a implementação de rotinas de inspeções/avaliação das estruturas de madeira são essenciais no sentido de detectar atentamente eventuais situações susceptíveis de comprometer a segurança da estrutura ou a sua durabilidade. Estas ações permitem ainda estabelecer ao ajustar programas de manutenção destinados manter ao longo da sua vida útil (CRUZ, 2007).

O programa de qualidade conta com vários especialistas, que entendem da importância do processo de certificação para conseguir a confiança do consumidor e a qualidade final do produto. Para predizer o desempenho estrutural da MLC com base nesse programa é necessária a realização de ensaios mecânicos diários, sistemas de avaliação em pontos estratégicos da produção e inspeção constante durante o processo de produção (CALIL NETO, 2011 apud MOLINA; NETO; CHRISTOFORO, 2016).

Destaca-se que todas essas atividades devem ser auditadas e verificadas por inspetores credenciados. É possível colar praticamente todos os tipos de madeiras. Entretanto, algumas espécies possuem características físicas e químicas que exigem o emprego de colas especiais ou a modificação destas, que são normalmente comercializadas para uso em madeiras estruturais (CALIL NETO, 2008 apud MOLINA; NETO; CHRISTOFORO, 2016).

2.6 Caracterização mecânica da madeira

De antemão a produção das vigas de MLC, são realizados os ensaios de caracterização da madeira para determinação de suas propriedades - efetivamente utilizadas nesta pesquisa. Para a caracterização mecânica das madeiras são realizados os métodos de ensaio especificados no anexo B da [ABNT 7190 \(1997\)](#).

2.6.1 Determinação da umidade e densidade

Para a determinação de umidade e densidade básica na madeira trabalhada, utiliza-se o corpo de prova ilustrado na Figura 2.

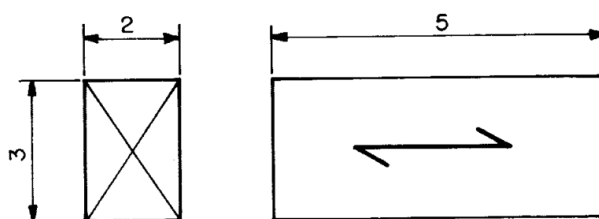


Figura 2 – Dimensões em centímetros do corpo-de-prova para determinação da umidade e densidade básica Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Para a determinação da umidade da madeira, como mostra a Equação (2.1), deve-se determinar a massa inicial e a massa seca do corpo-de-prova.

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Onde:

$U\%$ é o teor de umidade;

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

m_s é a massa da madeira seca, em gramas.

A densidade básica é uma massa específica convencional definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, sendo dada pela Equação (2.2).

$$P_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (2.2)$$

Onde:

P_{bas} é a densidade básica;

m_s é a massa seca da madeira, em quilogramas;

V_{sat} é o volume da madeira saturada, em metros cúbicos.

2.6.2 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, utiliza-se a seção crítica de um corpo-de-prova, como mostra a área hachurada da Figura 3.

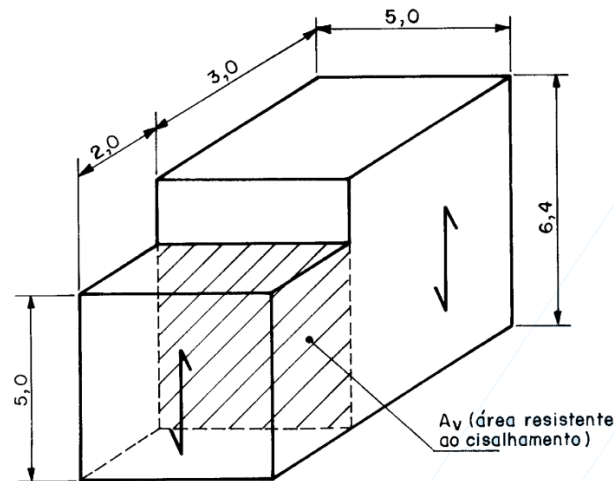


Figura 3 – Dimensões em centímetros do corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras Fonte: ABNT NBR 7190:1997

O cálculo da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira é dada pela Equação (2.3).

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (2.3)$$

Onde:

f_{v0} é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira;

$F_{v0,max}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpode-prova, em newtons;

A_{v0} é a área inicial da seção crítica do corpo-de-prova, em um plano paralelo às fibras, em metros quadrados.

2.6.3 Ensaio de compressão paralela às fibras

Para a realização do ensaio de compressão paralela às fibras deve-se produzir corpos de prova com as medidas apresentadas na Figura 4. Sendo determinada a máxima tensão de compressão que o corpo-de-prova suporta até a ruptura.

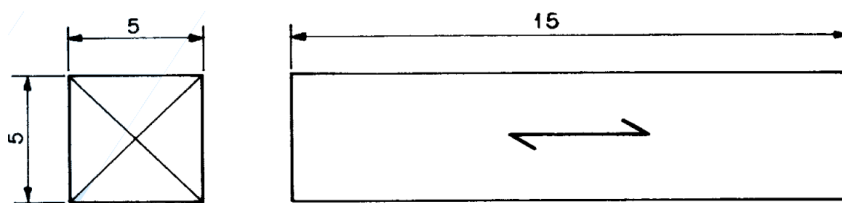


Figura 4 – Dimensões do corpo-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras
Fonte: ABNT NBR 7190:1997

A partir do ensaio de compressão obteve-se o valor máximo da força de compressão aplicada. A Equação (2.4) é utilizada para a determinação do valor da resistência à compressão paralela as fibras.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (2.4)$$

Onde:

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras, em megapascals;

$F_{c0,max}$ é a máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em newtons;

A é a área inicial da seção transversal comprimida, em metros quadrados.

2.6.4 Ensaio de flexão estática

Referente ao módulo de elasticidade das lamelas, são obtidos por meio da flexão estática, ensaio não destrutivo realizado na máquina universal de ensaios EMIC. Nos ensaios de flexão é estabelecida uma carga (dentro do trecho linear da curva tensão x deformação). O valor do módulo de elasticidade neste caso é obtido a partir da Equação (2.5).

$$E_M = \frac{PL^3}{48FI} \quad (2.5)$$

Onde:

E_M é o módulo de elasticidade das lamelas, em megapascals;

P é a força presente no trecho linear da curva, em megapascals;

L é a distância entre apoios, em milímetros;

F é a flecha correspondente à força P , em milímetros;

I é o momento de inércia, em quilo por metro quadrado.

2.7 Classificação visual da madeira

A classificação visual das lamelas é feita de acordo com o projeto de norma ABNT NBR PN-02-126.10-001-1. Que tem como objetivo a classificação realizada a

partir da inspeção visual das duas faces de cada peça com relação à presença de defeitos, desconsiderando aqueles com ocorrência exclusiva nos topos e bordas. São avaliados oito principais tipos de defeitos presentes na madeira, sendo:

2.7.1 Nós

Segundo a norma citada anteriormente, só são avaliados os nós firmes, onde, ocorrendo a presença de nós cariados, soltos ou vazados em uma peça é motivo de seu descarte para uso estrutural. A expressão do nó é dada em termos da relação entre o seu diâmetro (D) e a dimensão da face considerada (L), como mostram as Figuras 5, 6 e 7.

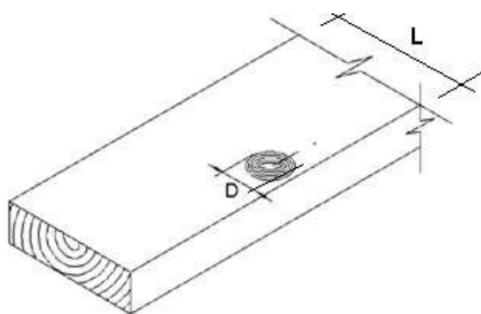


Figura 5 – Medição de um nó Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

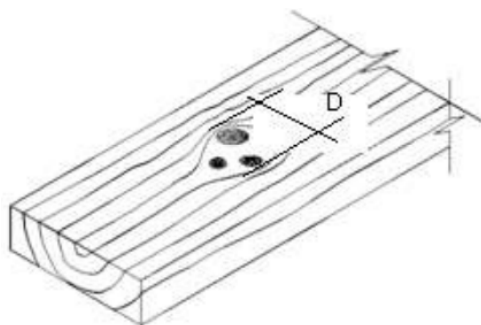


Figura 6 – Medição de um conjunto de nós Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

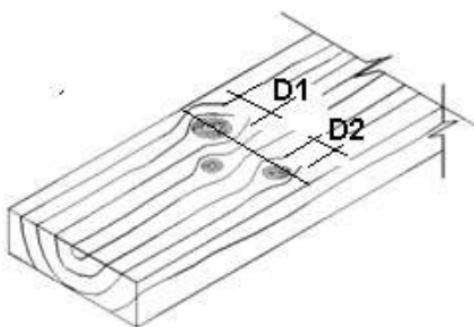


Figura 7 – Medição de nós com ocorrência de dois deles na mesma seção transversal
Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

2.7.2 Inclinação das fibras

A inclinação das fibras, representado por (i), é determinada ao longo das duas faces da peça, como mostra a equação da Figura 8.

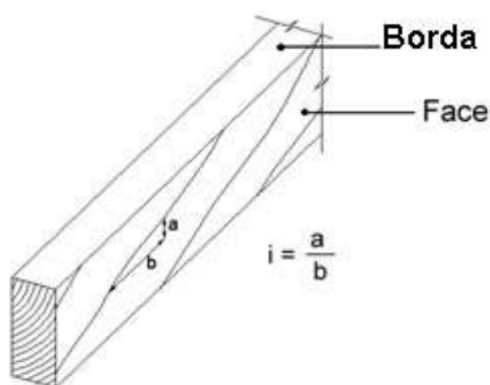


Figura 8 – Medição da inclinação das fibras Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

2.7.3 Fissuras

As fissuras são divididas em passantes, não passantes, fendilhadas e rachas. Sendo chamadas respectivamente de: *splits*, *checks*, *seasoning cheks* e *shakes*. Seus comprimentos (L) são mensurados paralelamente ao comprimento da peça. Suas larguras são mensuradas ao longo da seção transversal da peça Figura 9.

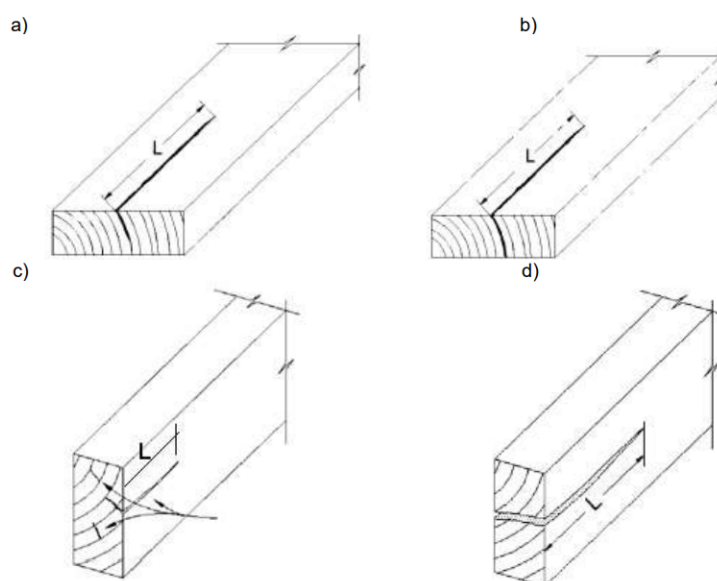


Figura 9 – Medição do comprimento de fissuras: a) e b) racha; c) fissura não passante; d) fissura passante (fendilhado de topo) Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

2.7.4 Encurvamento

Considera-se o encurvamento da peça em relação ao eixo de menor inércia. Medido no ponto de maior deslocamento em relação à linha reta que une as duas extremidades da peça, Figura 10.

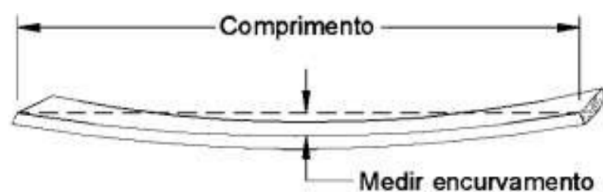


Figura 10 – Medição do encurvamento Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

2.7.5 Encanoamento

Para o empenamento da peça de madeira, mede-se o ponto de maior deslocamento em relação à linha reta que une as duas bordas da peça Figura 11.

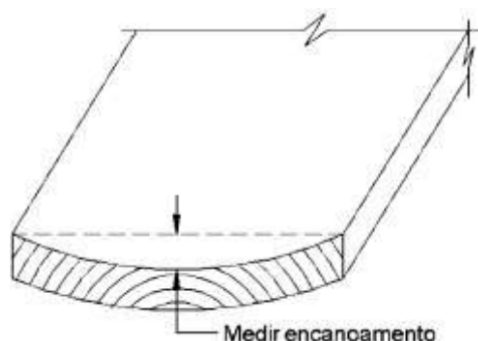


Figura 11 – Medição do encanoamento Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

2.7.6 Arqueamento

Para o arqueamento mede-se o ponto de maior deslocamento em relação à linha reta que une as duas extremidades da peça Figura 12.

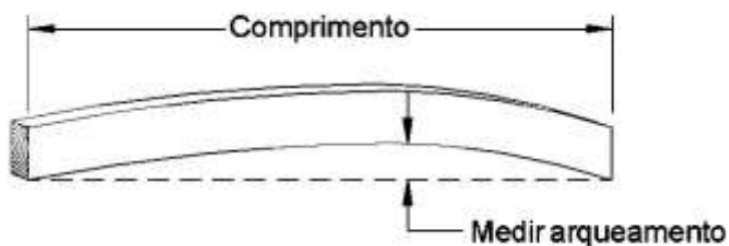


Figura 12 – Medição do arqueamento Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

2.7.7 Torcimento

Considera-se a combinação de empenamentos em relação aos eixos de maior e de menor inércia, resultando em uma peça de madeira na forma espiralada Figura 13.

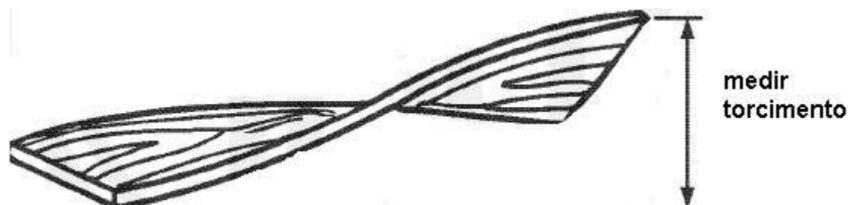


Figura 13 – Medição do torcimento Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

2.7.8 Esmoado

Por fim, considera-se esmoado, a ausência de madeira na quina de uma peça de madeira serrada causada por qualquer motivo. O comprimento (L) foi mensurado paralelamente ao comprimento da peça Figura 14.

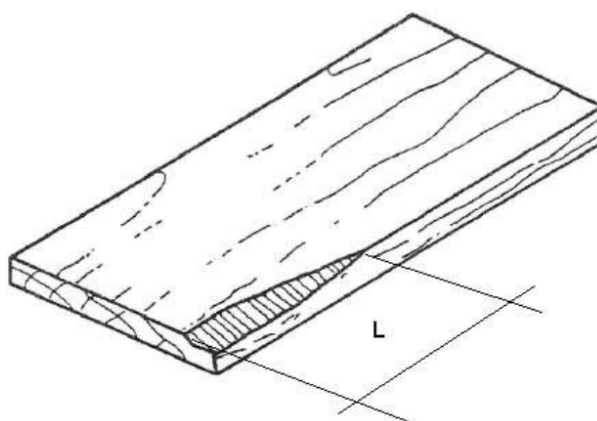


Figura 14 – Medição do comprimento do esmoado Fonte: ABNT NBR PN-02-126.10-001-1

2.8 Teste de qualidade de colagem de elementos estruturais de MLC

As vigas de MLC são utilizadas com dimensões de 50mm x 100mm x 1200mm e cada lamela tem 20mm de espessura. Posteriormente, são retiradas as amostras para os ensaios de delaminação e da resistência de cisalhamento da linha de cola através do corte das vigas de MLC na direção normal às fibras da madeira, com base no projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-5. As amostras retiradas, neste caso, possuem dimensões 50mm x 100mm x (entre 75 a 100mm), tanto para os ensaios de delaminação quando para os ensaios de resistência de cisalhamento da linha de cola.

2.8.1 Ensaio de delaminação da linha de cola

Inicialmente, para a determinação da delaminação da linha de cola, as amostras - Figura 15 - devem ser pesadas a fim de definir a massa inicial. Posteriormente, devem ser colocadas na autoclave e submergidas em água a uma temperatura de 10°C a 20°C e, na sequência, aplica-se um vácuo de 70kPa a 85kPa durante 30 minutos. Assim, os corpos de prova ficam submetidos por 2 horas a uma pressão entre 500kPa e 600kPa.

Após o ciclo de vácuo-pressão, as amostras são secas na câmara climatizadora, onde devem continuar até que a massa do corpo de prova alcance um valor compreendido entre 100% e 110% da massa inicial. A temperatura deve estar entre 65°C e 75°C. Dentro da estufa o fluxo de ar deve estar entre 2 a 3 m/s e a umidade relativa em torno de 8% a 10%.

A delaminação máxima permitida na amostra após a realização do ensaio é de 6%. A avaliação da abertura linha de cola é feita através da medida das linhas de cola das face frontal e posterior da amostra retirada do elemento de MLC, sem considerar as delaminações das linhas de cola laterais do elemento. Assim, a abertura da linha de cola a ser considerada na delaminação é sempre com relação ao comprimento total - somatória - das linhas de cola medidos antes dos ensaios de vácuo e pressão na autoclave.

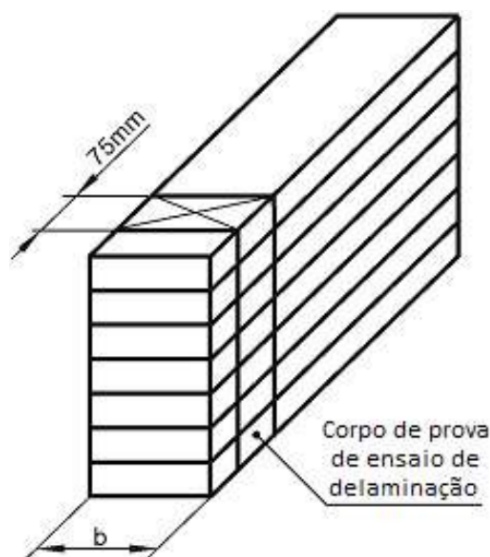


Figura 15 – Corpo-de-prova para ensaio de delaminação da linha de cola Fonte:ABNT NBR PN 02:126.10-001-5

A porcentagem de delaminação total para cada corpo de prova é calculada mediante a Equação (2.6).

$$D_t = \frac{L_a}{L_t} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Onde:

Dt é a delaminação total, em porcentagem;

La é a somatória das larguras das juntas abertas ou delaminadas sobre as faces da seção transversal, em milímetros;

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

2.8.2 Ensaio de cisalhamento da linha de cola

Numa segunda série de ensaios, os planos de cola dos corpos de prova - Figura 16 - são submetidos a forças de cisalhamento, aplicadas na direção paralela às fibras da madeira, incrementadas gradualmente até a obtenção da falha.

São, assim, determinadas as resistências ao cisalhamento das linhas de cola. Para isso, devem ser medidas as alturas (t) e as larguras (b) das superfícies coladas submetidas ao cisalhamento, considerando-se em média um mínimo de duas medições tomadas nos extremos da superfície, sendo que as amostras são pesadas para determinação de suas massas.

As amostras são colocadas no dispositivo metálico e às mesmas sofrem a aplicação das cargas numa velocidade de ensaio constante, de modo que a falha na linha de cola da amostra seja provocada em aproximadamente 20 segundos pelo menos.

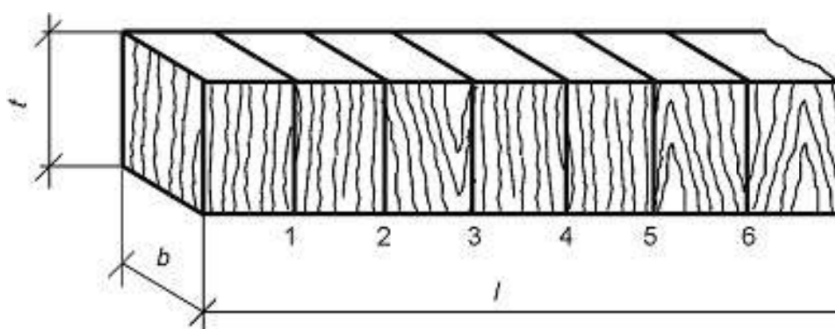


Figura 16 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento da linha de cola Fonte:ABNT NBR PN 02:126.10-001-5

A resistência ao cisalhamento para a linha de cola é calculada com a Equação (2.7).

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b.t} \quad (2.7)$$

Onde:

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

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

b é a largura do corpo de prova, em milímetros;

t é a altura do corpo de prova, em milímetros.

3 Materiais e Métodos

A metodologia dos ensaios experimentais de elementos de MLC utilizados para a análise teórica dos resultados utilizaram as dimensões (50mm x 100mm x 75mm) dos corpos de prova descritas no capítulo anterior. Assim como, definidas em função da disponibilidade de equipamentos e espaço físico para ensaios disponíveis no Laboratório de Propriedades dos Materiais da Unesp de Itapeva.

3.1 Produção dos elementos de MLC

Inicialmente, foram usinadas seis vigas de madeira serrada de eucalipto para se obter 10 lamelas - de cada tora - com dimensões de 50mm de largura, 20mm de espessura e 1200mm de comprimento. Assim como, foram retirados de cada uma das toras seis corpos de prova para a determinação da umidade das lamelas, três corpos de prova para a determinação da resistência à compressão das lamelas - e por fim - três corpos de prova para a determinação da resistência ao cisalhamento também das lamelas.

3.1.1 Umidade

Tanto as lamelas, quanto os corpos de prova passaram pelo processo de secagem, onde puderam atingir a umidade de $12\% \pm 1$. A umidade das lamelas foi calculada a partir da equação (2.1) - do presente trabalho - de acordo com o anexo B da [ABNT 7190 \(1997\)](#). A Figura 17, mostra as lamelas embaladas conforme atingiam o teor de umidade correto.



Figura 17 – Lamelas secas até 12% de umidade Fonte: Autor

3.1.2 Classificação mecânica das lamelas

Para a caracterização mecânica das lamelas, foram realizados os métodos de ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, resistência à compressão paralela às fibras e de flexão estática não destrutiva - de acordo com o anexo B da [ABNT 7190 \(1997\)](#) - como mostra as Figuras 18, 19 e 20 - respectivamente.

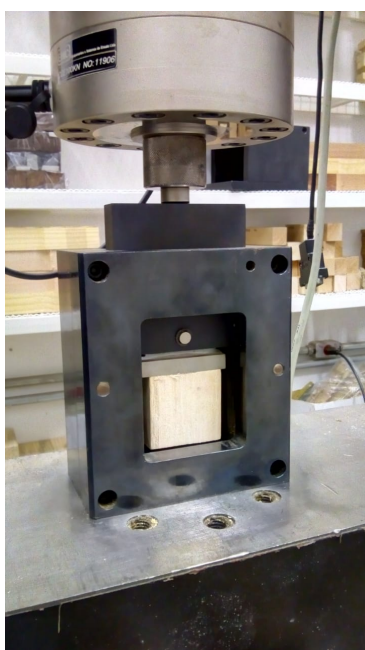


Figura 18 – Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras Fonte: Autor

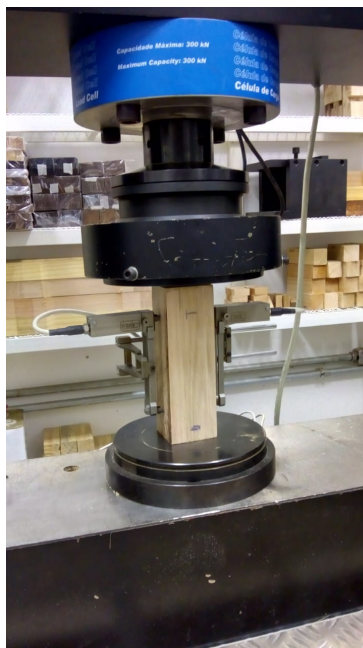


Figura 19 – Ensaio de compressão paralela às fibras Fonte: Autor



Figura 20 – Ensaio de flexão estática não-destrutiva Fonte: Autor

3.1.3 Classificação visual das lamelas

As lamelas foram classificadas visualmente de acordo com o projeto de norma ABNT NBR PN-02-126.10-001-1, citado no tópico (2.7) do presente trabalho.

3.1.4 Colagem e prensagem das vigas

O adesivo fenólico Cascophen RS-216M com catalisador em pó, foi utilizado para a colagem das lamelas - Figura 21 - em uma proporção de 10:2 (Adesivo:Catalisador). Sendo uma colagem de 5 lamelas, cada viga, portanto, contou com 4 linhas de cola. A superfície de cola apresentou área de $0,06\text{m}^2$, para a gramatura de $200,00\text{g/m}^2$, portanto, sendo utilizados $12,00\text{g}$ de adesivo para cada linha de cola e $2,40\text{g}$ de catalisador.



Figura 21 – Aplicação do adesivo nas lamelas Fonte: Autor

A prensagem das vigas teve duração de 72 horas e utilizou dois torquímetros e uma prensa - Figura 22. Para a prensagem foi necessário um total de quatro fusos para abranger toda a viga, sendo que, em cada um dos braços utilizou-se duas barras roscadas.



Figura 22 – Prensagem das vigas Fonte: Autor

Nos cálculos iniciais definiu-se o torque necessário de $13,64\text{N.m}$ - para atingir a pressão de $1,0\text{ MPa}$ - no entanto, a escala mínima do primeiro torquímetro excedia

esse valor - sendo 60N.m - além de ser o único disponível em laboratório após o início da aplicação de cola das vigas 1, 2 e 3 de MLC. Já para as vigas 4, 5 e 6 de MLC, foi adquirido um segundo torquímetro, o qual abrangia o valor mínimo calculado. O resultado da colagem pode ser visto na Figura 23.



Figura 23 – Resultado da colagem Fonte: Autor

3.2 Teste de qualidade de colagem de elementos estruturais de MLC

3.2.1 Ensaio de delaminação da linha de cola

A autoclave confeccionada para a realização do ensaio tem formato cilíndrico, com comprimento de 1050mm e diâmetro de 480mm. A espessura da parede do cilindro metálico é de aproximadamente 11,2mm, neste caso. A autoclave tem ainda uma bomba de vácuo com manômetro de controle acoplado, com capacidade para aplicação 75kPa, além de um recipiente(tambor) para o armazenamento de água a ser utilizada no ensaio de delaminação. Um segundo cilindro metálico menor(tipo kitassato) é posicionado na parte superior do equipamento para controle do excesso de água durante a aplicação do vácuo. A pressão positiva na autoclave é aplicada por um sistema de ar comprimido externo, com controle da pressão através de um segundo manômetro. A interligação entre os cilindros da autoclave, manômetros e recipiente de água é feita através de canos metálicos com diâmetros aproximados de 21,3mm. No interior do equipamento é colocada uma chapa metálica com furos(chapa moeda) com requadro metálico para manter os corpos de prova submersos em água durante a realização dos ensaios de delaminação da linha de cola. A Figura 24 mostra a autoclave construída.



Figura 24 – Autoclave construída para os ensaios de delaminação Fonte: Autor

No total, foram confeccionados sete corpos de prova (50mm x 100mm x 75mm) para cada elemento de MLC. O ensaio foi feito com base no tópico (2.8.2) do presente trabalho. Os corpos de prova foram colocados na autoclave - Figura 25 - a uma pressão de 550kPa.

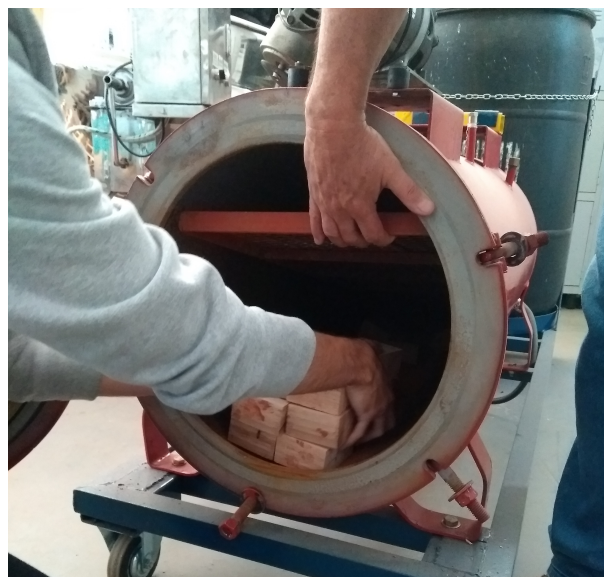


Figura 25 – Corpos de prova na autoclave Fonte: Autor

Posteriormente, os corpos de prova foram imediatamente secos em estufa regulada a uma temperatura de 70°C por um período total, não consecutivo, de 22 horas - Figura 26.



Figura 26 – Corpos de prova durante o processo de secagem Fonte: Autor

No caso da estufa, para manter a umidade relativa interna em torno de 8% a 10% houve a necessidade de estipular o intervalo da temperatura de bulbo úmido - já sendo conhecida a temperatura de bulbo seco de 70°C - para isso foi necessário definir uma equação através da tabela intitulada "Umidade relativa (UR) em função da temperatura de termômetro seco (T_s) e da diferença higrométrica ($T_s - T_u$)" de [Galvão e Jankowsky \(1985\)](#), chegando a temperatura de bulbo úmido, sendo portanto, de 30°C a 34°C.

3.2.2 Ensaio de cisalhamento para cada linha de cola

A máquina utilizada para a realização do ensaio foi a EMIC com capacidade de 300kN (30.000kgf). No total, foram confeccionados sete corpos de prova (50mm x 100mm x 75mm) para cada elemento de MLC - como mostra a Figura 27 para o elemento 1 de MLC. O ensaio foi feito com base no tópico (2.8.2) do presente trabalho.



Figura 27 – Corpos de prova de cisalhamento do elemento 1 de MLC Fonte: Autor

Além disso, para a realização dos ensaios foi confeccionado um dispositivo metálico composto por chapas de aço com espessuras de 3/4" e aparato para a

aplicação da força de cisalhamento na direção das fibras, na linha de cola, sendo a placa metálica superior com altura ajustável - Figura 28.



Figura 28 – Dispositivo para os ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola
Fonte: Autor

3.3 Análise estatística

O resultado das delaminações das linhas de cola foram divididas em duas análises através do (Teste t), considerando um intervalo de confiança de 95%. O primeiro foi para constatar se existiu alguma diferença entre os valores das diferentes pressões aplicadas, já o segundo foi em relação a porcentagem máxima de delaminação da linha de cola estipulada.

Foram obtidos o valores médio da resistência ao cisalhamento da linha de cola, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação para as amostras ensaiadas. Foi avaliada, por análise visual com o auxílio do paquímetro, a porcentagem de ruptura na madeira após o ensaio de cada grupo (espécie-adesivo) de vigas de MLC. Os resultados obtidos para as resistência ao cisalhamento da linha de cola de cada grupo de vigas de MLC também foram avaliados pelo teste (ANOVA) para verificar a variabilidade dos resultados de resistência entre os grupos, sendo considerando um intervalo de confiança de 95%.

4 Resultados

4.1 Caracterização das lamelas

Foram utilizadas 30 das 60 lamelas confeccionadas, sendo estas, as que se enquadravam na classificação visual, assim como, as de maior resistência segundo a classificação mecânica à 12%. Para a produção dos elementos de MLC, foram escolhidas para as extremidades as lamelas que possuísem os maiores módulos de elasticidade, assim como, posicionadas na ordem apresentada nas Tabelas 1 a 6.

Tabela 1 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 1 de MLC

Viga 1	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
Lamela 27	1	22268	24742	57,12	8,22	573
Lamela 58	2	17342	19269	58,94	7,17	620
Lamela 11	1	16116	17907	48,22	7,51	577
Lamela 08	2	18525	20583	44,17	7,09	619
Lamela 06	1	18552	20613	44,17	7,09	624

Tabela 2 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 2 de MLC

Viga 2	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
Lamela 07	1	22150	24611	44,17	7,09	584
Lamela 05	1	17342	19269	58,94	7,17	620
Lamela 32	1	17143	19048	60,59	7,56	592
Lamela 35	1	18445	20494	60,59	7,56	630
Lamela 21	2	18680	20756	57,12	8,22	571

Tabela 3 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 3 de MLC

Viga 3	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
Lamela 02	2	20728	23031	44,17	7,09	641
Lamela 36	1	17342	19269	58,94	7,17	620
Lamela 37	1	17048	18942	60,59	7,56	591
Lamela 26	1	18445	20494	60,59	7,56	630
Lamela 31	1	18894	20993	60,59	7,56	631

Tabela 4 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 4 de MLC

Viga 4	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
Lamela 23	1	20582	22869	57,12	8,22	581
Lamela 48	3	17342	19269	58,94	7,17	620
Lamela 54	3	16095	17883	58,94	7,17	606
Lamela 25	2	18151	20168	57,12	8,22	575
Lamela 38	1	18969	21077	60,59	7,56	594

Tabela 5 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 5 de MLC

Viga 5	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
Lamela 04	1	20512	22791	44,17	7,09	606
Lamela 03	1	17718	19687	44,17	7,09	608
Lamela 16	2	16854	18727	49,22	7,51	587
Lamela 39	1	17834	19816	60,59	7,56	592
Lamela 47	2	18980	21089	61,43	9,58	600

Tabela 6 – Valores de caracterização das lamelas do elemento 6 de MLC

Viga 6	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
Lamela 01	1	20050	22278	44,17	7,09	663
Lamela 24	3	17742	19713	57,12	8,22	589
Lamela 22	2	16357	18174	57,12	8,22	580
Lamela 33	1	17783	19759	60,59	7,56	615
Lamela 40	2	19048	21164	60,59	7,56	642

Onde:

E_M é o módulo aparente de elasticidade na flexão;

E_{c0} é o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras;

f_{c0m} é o valor médio da resistência à compressão paralela às fibras;

f_{v0m} é o valor médio da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;

ρ_{ap} é a densidade aparente.

4.2 Ensaio de delaminação da linha de cola

Através da Equação (2.6) foi calculada a porcentagem de delaminação da linha de cola de sete corpos de prova - nomeados de D1 a D7 - retirados para cada elemento

de MLC. Os resultados podem ser vistos da Tabela 7 a 9 para o torque de colagem de 60N.m e da Tabela 10 a 12 para o torque de colagem de 13,64N.m:

Tabela 7 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 1 de MLC

Viga 1	Linha total(mm)	Delaminação(mm)	Delaminação(%)
D1	361,88	8,13	2,25
D2	358,52	16,11	4,49
D3	359,19	26,14	7,28
D4	361,93	34,25	9,46
D5	362,11	56,41	15,58
D6	359,97	27,99	7,78
D7	359,89	6,59	1,83

Tabela 8 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 2 de MLC

Viga 2	Linha total(mm)	Delaminação(mm)	Delaminação(%)
D1	333,34	16,53	4,96
D2	332,48	0,00	0,00
D3	333,84	0,00	0,00
D4	334,86	3,91	1,17
D5	333,21	0,00	0,00
D6	336,44	17,64	5,24
D7	297,94	0,00	0,00

Tabela 9 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 3 de MLC

Viga 3	Linha total(mm)	Delaminação(mm)	Delaminação(%)
D1	351,27	52,10	14,83
D2	354,93	7,61	2,14
D3	356,31	37,24	10,45
D4	354,75	38,06	10,73
D5	356,98	45,98	12,88
D6	356,82	20,19	5,66
D7	358,27	77,14	21,53

Tabela 10 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 4 de MLC

Viga 4	Linha total(mm)	Delaminação(mm)	Delaminação(%)
D1	352,00	65,32	18,56
D2	357,14	130,56	36,56
D3	356,17	223,25	62,68
D4	356,26	232,20	65,18
D5	305,69	218,26	71,40
D6	352,17	134,81	38,28
D7	357,86	72,44	20,24

Tabela 11 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 5 de MLC

Viga 5	Linha total(mm)	Delaminação(mm)	Delaminação(%)
D1	360,85	151,64	42,02
D2	360,88	124,27	34,44
D3	359,56	89,52	24,90
D4	359,51	28,34	7,88
D5	361,02	65,09	18,03
D6	361,33	83,36	23,07
D7	359,56	78,86	21,93

Tabela 12 – Valores de delaminação da linha de cola do elemento 6 de MLC

Viga 6	Linha total(mm)	Delaminação(mm)	Delaminação(%)
D1	356,28	126,64	35,55
D2	358,13	163,61	45,68
D3	355,88	178,05	50,03
D4	356,79	190,18	53,30
D5	356,15	74,97	21,05
D6	355,22	139,04	39,14
D7	357,08	167,03	46,78

A Figura 29 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 com 0,00% e o corpo de prova (D5) da viga 4 com 71,40% - respectivamente.



Figura 29 – Resultado do ensaio de delaminação Fonte: Autor

O primeiro passo para a análise estatística foi a normalização dos resultados das porcentagens de delaminação da linha de cola, sendo necessário transformar os dados através da equação (4.1):

$$Normalizado = \arcsin \sqrt{\frac{Delaminado}{100}} \quad (4.1)$$

Com os dados normalizados, duas questões foram testadas. A primeira análise testa a hipótese de igualdade entre as duas pressões. Já a segunda análise testa se cada um dos dois grupos tem maior percentagem de delaminação da linha de cola que 6% - dada como a máxima pelo projeto de norma. As Tabelas 13 e 14 mostram as análises.

Tabela 13 – Primeira análise estatística (Test t): diferenças entre torques

Causa	t	df	p-value	Intervalo de confiança	Hipótese
Torques	-12,567	20	5,99e-11	-0,4948 a -0,3595	Rejeitada

Tabela 14 – Segunda análise estatística (Test t): diferenças entre a percentagem de delaminação da linha de cola resultante com a máxima delaminação da linha de cola de 6%

Causa	t	df	p-value	Intervalo de confiança	Hipótese
Torque: 60N.m	-0,8493	20	0,2029	-Inf a 0,2751	Aceita
Torque: 13,64N.m	9,7429	20	1,00	-Inf a 0,7153	Aceita

Em resumo, a análise dos elementos de MLC mostra que o processo produtivo não foi satisfatório, ou seja, o resultado da aplicação das diferentes pressões causaram diferença nas percentagens de delaminação da linha de cola sendo que nos dois casos esse valor é superior ao indicado pelo projeto de norma - com exceção da viga 2 - Figura 30.

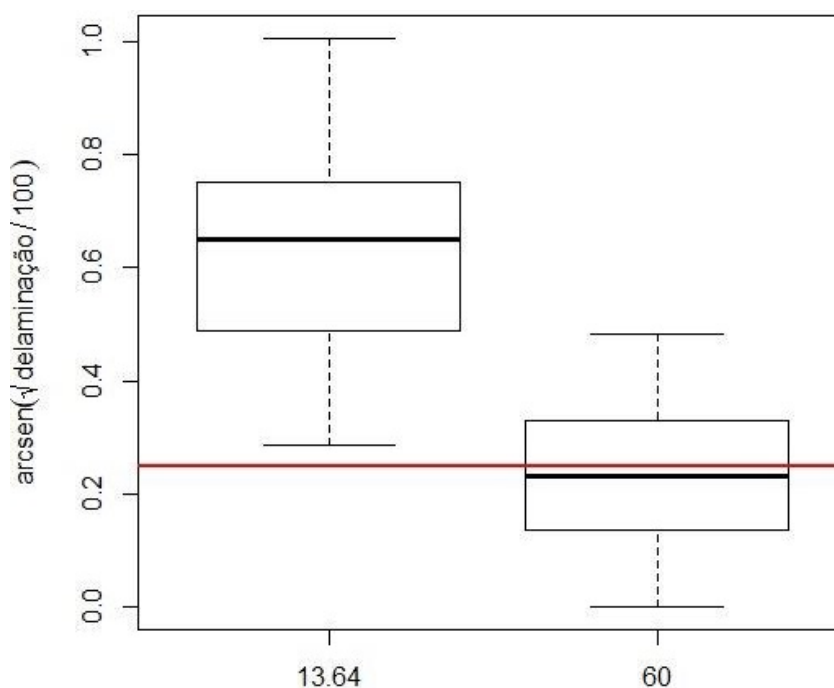


Figura 30 – Resultado da análise estatística para a delaminação da linha de cola Fonte: Autor

4.3 Ensaio de cisalhamento da linha de cola

Através da Equação (2.7) foi calculada a resistência ao cisalhamento da linha de cola de sete corpos de prova - nomeados de C1 a C7 - retirados para cada elemento de MLC. Os resultados podem ser vistos da Tabela 15 a 17 para o torque de colagem de 60N.m e da Tabela 18 a 20 para o torque de colagem de 13,64N.m:

Tabela 15 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 1 de MLC

Viga 1	Linha de cola(MPa)			
	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta
C1	7,39	9,45	6,73	5,42
C2	3,96	5,20	9,43	5,20
C3	6,41	9,15	6,64	6,41
C4	6,47	10,91	8,93	6,89
C5	6,51	9,53	8,11	8,47
C6	6,89	9,92	2,38	7,72
C7	5,44	9,66	8,14	5,68

Tabela 16 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 2 de MLC

Viga 2	Linha de cola(MPa)			
	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta
C1	6,48	7,27	6,96	7,25
C2	8,37	7,70	8,51	6,86
C3	7,06	6,64	6,64	6,20
C4	7,91	7,37	8,08	8,57
C5	7,99	7,50	7,59	9,52
C6	8,33	7,31	7,93	8,05
C7	8,30	7,91	7,66	7,48

Tabela 17 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 3 de MLC

Viga 3	Linha de cola(MPa)			
	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta
C1	7,85	6,89	7,22	6,36
C2	6,96	2,39	7,97	5,37
C3	7,06	2,63	7,58	5,58
C4	7,53	7,51	7,67	7,75
C5	7,86	5,32	6,34	6,21
C6	6,69	7,32	3,07	5,83
C7	6,82	6,39	6,64	6,46

Tabela 18 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 4 de MLC

Viga 4	Linha de cola(MPa)			
	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta
C1	1,06	5,51	3,66	2,22
C2	3,77	6,90	4,28	2,09
C3	1,17	4,72	2,38	1,92
C4	5,95	5,83	4,89	4,67
C5	4,28	9,90	1,98	3,80
C6	2,72	5,54	5,76	3,56
C7	4,56	5,30	1,10	3,49

Tabela 19 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 5 de MLC

Viga 5	Linha de cola(MPa)			
	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta
C1	8,57	7,59	8,98	3,09
C2	4,99	5,60	5,44	6,10
C3	6,30	3,90	4,24	5,06
C4	7,21	7,12	7,85	4,78
C5	7,56	8,88	0,46	4,84
C6	5,38	6,45	6,15	5,75
C7	12,48	8,21	2,55	6,92

Tabela 20 – Valores de cisalhamento da linha de cola do elemento 6 de MLC

Viga 6	Linha de cola(MPa)			
	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta
C1	4,36	4,67	7,49	5,09
C2	6,16	5,02	5,01	3,91
C3	4,01	3,25	4,41	6,76
C4	4,41	4,46	4,22	5,09
C5	5,02	5,50	6,32	6,48
C6	2,30	6,06	3,09	3,91
C7	6,92	4,24	7,16	5,32

Seguindo para a análise estatística, foram testadas em conjunto a influência dos dois grupos de pressões aplicadas e cada uma das quatro linhas de cola entre si para cada um dos 6 elementos de MLC - Tabela 21.

Tabela 21 – Análise estatística (ANOVA): Causa das variações de cisalhamento da linha de cola

Causa	df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Hipótese
Torque	1	171,30	171,32	59,32	1,34e-12	Diferem
Elemento de MLC	5	85,10	21,28	7,36	1,81e-5	Diferem
Linha de cola	3	21,5	7,16	2,47	0,063	Não diferem

A partir dos resultados obtidos pode-se afirmar que a resistência ao cisalhamento da linha de cola diferem segundo aplicação das duas pressões e em relação de um elemento de MLC ao outro. Porém, ao analisar de forma individual os elementos de MLC, verifica-se que a resistência ao cisalhamento das quatro linhas de cola não diferem entre si - Figura 31.

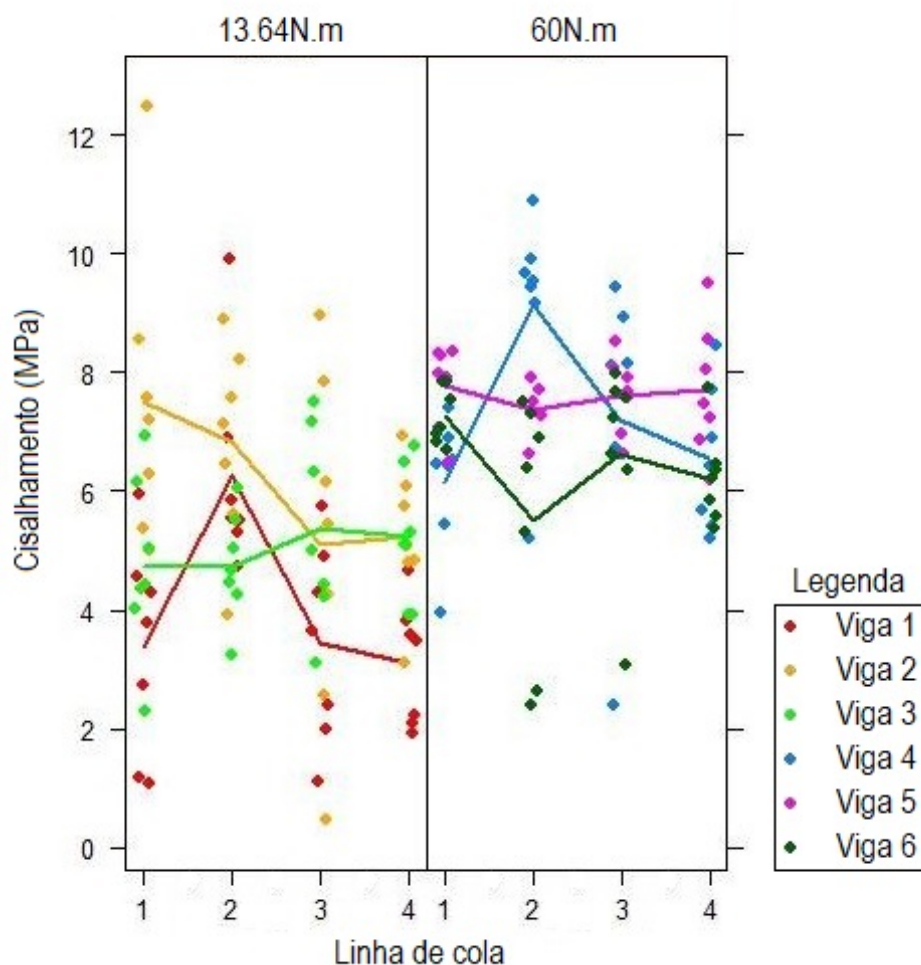


Figura 31 – Resultado da análise estatística para o cisalhamento da linha de cola Fonte: Autor

A partir da figura anterior fica claro que as vigas coladas com o torque de 60N.m resistiram em média mais que as coladas com 13,64N.m. Além disso, é pertinente destacar que a maior parte das linhas de cola não romperam - a ponto de descolarem - porém, das que romperam, a maior parte foi na viga 4 e 6 com 39%, já a viga 5 teve a menor porcentagem, sendo 18%.

Nas linhas de cola rompidas, pode-se dizer que em média 72% das rupturas foram na madeira no caso das vigas coladas com torque de 60N.m, enquanto para as vigas coladas com torque de 13,64N.m só de 43% das rupturas foram na madeira.

Dentre as combinações produzidas, foi a viga 2 que atingiu a maior resistência ao cisalhamento da linha de cola de 6,43MPa, com percentual de ruptura na madeira alcançando os 78%, um sinal importante visto a função estrutural em ambientes externos.

5 Conclusão

Os métodos de ensaios propostos pelo projeto de norma ABNT NBR 02:126.10-001-5 precisam ser melhorados. A começar pela possibilidade de variação das proporções dos corpos de prova de MLC - não limitando a quantidade de lamelas por viga de MLC - e em contra partida fixação de procedimentos - como o tempo de secagem na delaminação da linha de cola - por exemplo.

A autoclave confeccionada para realizar o ensaio de delaminação da linha de cola demonstrou ser compatível com as necessidades do experimento, porém, a estufa disponível não possuía controle da velocidade de circulação do ar, só sendo possível controlar a temperatura e a umidade relativa interna. As porcentagens de delaminação da linha de cola foram - em sua maioria - superiores aos definidos pelo projeto de norma, onde, o torque de colagem demonstrou interferir diretamente nos resultados, assim com, a secagem, por não ter sido contínua.

No caso do ensaio de cisalhamento da linha de cola, o dispositivo construído demonstrou ser apto para o experimento, entretanto, as forças de cisalhamento das linhas de cola foram baixas e diferem comparando os torques de colagem e de uma viga para a outra, todavia, ao analisar individualmente todas as vigas de MLC, verifica-se que a resistência ao cisalhamento das quatro linhas de cola não diferem entre si.

A resina utilizada demonstrou diferentes respostas em relação a resistência e aderência à madeira. Em ambos os ensaios de linha de cola, tanto para delaminação quanto para o cisalhamento, os resultados foram melhores com torque de 60N.m do que 13,64N.m.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Em trabalhos futuros recomenda-se secar de maneira natural as lamelas até estabilizarem com o ambiente e posteriormente leva-las à estufa para atingirem o teor de umidade de 12%.

Para a confecção dos elementos de MLC, recomenda-se a utilização de um mesmo torque para todas as vigas - no caso da prensa utilizada em específico.

No caso do ensaio de delaminação da linha de cola, recomenda-se fazer em estufa um controle programado da umidade relativa e velocidade de circulação do ar, além do início da secagem, de modo a se ter o término do período de secagem próximo ao horário de funcionamento do local de ensaio - evitando interrupções.

Por último, aconselha-se marcar as linhas de cola para facilitar o posicionamento do corpo de prova no dispositivo de cisalhamento ou adicionar uma régua no dispositivo metálico para melhor orientação das linhas.

Referências

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*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010. Citado na página 27.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, 1997. 107 p. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 29, 39 e 40.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. *Dimensionamento de elementos estruturais de madeira*. [S.l.]: Editora Manole, 2003. Citado na página 23.

CALIL NETO, C. *Recomendações para o controle de qualidade na produção de madeira laminada colada (mlc) certificada*. 86 f. itapeva, 2008. *Monografia (Graduação Engenharia Industrial Madeireira)—Escola de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, 2008*. Citado na página 28.

CALIL NETO, C. *Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie–adesivo–tratamento preservativo*. 2011. 120f. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.[Links], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 28.

CALIL NETO, C. et al. Numerical modeling of connections behavior with self-tapping screws disposed in x position in specimens of mlc with eucalyptus urograndis woods. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 22, n. 1, 2017. Citado na página 19.

CARVALHO, P. A. R. d. et al. Avaliação técnica e económica de estruturas de cobertura de grande vão em madeira lamelada colada. 2008. Citado na página 23.

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*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 27.

CRUZ, H. Estruturas de madeira lamelada colada em portugal. instrumentos para a garantia da qualidade. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II*, v. 1, p. 45–56, 2007. Citado na página 28.

FIORELLI, J. *Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005. Citado na página 27.

GALVÃO, A. d.; JANKOWSKY, I. P. *Secagem racional da madeira*. [S.l.: s.n.], 1985. Citado na página 45.

GOMES, N. B. *Análise de elementos estruturais de mlc na flexão com base na versão de revisão da norma abnt nbr 7190: 2013*. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2018. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.

- GONÇALVES, M. T. T. *Processamento da madeira*. [S.l.]: Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, 2000. Citado na página 23.
- GONZAGA, A. L. *Madeira: uso e conservação*. [S.l.]: IPHAN, 2006. Citado na página 23.
- GONZAGA, J. Qualidade da madeira e da celulose kraft de treze espécies de eucalyptus. *Viçosa/MG, UFV*, 1983. Citado na página 24.
- HILLIS, W.; BROWN, A. Eucalyptus for wood production. chapter 14. *Reconstituted Wood Products. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Melbourne, Victoria, Austrália*, p. 317–321, 1978. Citado na página 24.
- JESUS, J. M. H. d. *Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- KOLLMANN, F. F.; COTE, W. *Principles of Wood Science and Technology. Volume 2. Wood Based Materials*. [S.l.]: Allen & Unwin, 1975. Citado na página 25.
- LAURIE, A. P. *The Materials of the Painter's Craft in Europe and Egypt from the Earliest Times to the XVIIth Century...* [S.l.]: TN Foulis, 1910. Citado na página 24.
- MACÊDO, A. N. *Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): Avaliação de método de ensaio*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1996. Citado na página 26.
- MACEDO, A. N.; JUNIOR, C. C. Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (mlc): avaliação de método de ensaio—nbr 7190/1997. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v. 3, p. 1–23, 1999. Citado na página 25.
- MARQUES, L. E. M. M. et al. O papel da madeira na sustentabilidade da construção. 2008. Citado na página 23.
- MIOTTO, J. L. *Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- MOLINA, J. C.; NETO, C. C.; CHRISTOFORO, A. L. Resistência à tração de emendas dentadas de madeira de manilkara huberi para o emprego em madeira laminada colada. *Ambiente Construído*, v. 16, n. 1, p. 221–227, 2016. Citado na página 28.
- OLIVEIRA, J. T. d. S.; SILVA, J. d. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de eucalyptus saligna sm. *SciELO Brasil*, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- PEREIRA, J. C. D. et al. *Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil*. [S.l.]: Embrapa Florestas Colombo, 2000. Citado na página 24.
- SANTOS, L. *AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2014. Citado na página 28.

SKEIST, I. Handbook of adhesives, reinhold pub. *Corp., London*, p. 683, 1962. Citado na página 24.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de eucalyptus saligna. *Cerne*, v. 2, n. 1, p. 94–111, 1996. Citado na página 24.