

CARLLA CAMILLY VERNEQUE CORDEIRO DE MOURA JORGE

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ELEMENTOS DE MADEIRA LAMELADA
PREGADA (*NAIL LAMINATED TIMBER*)

CARLLA CAMILLY VERNEQUE CORDEIRO DE MOURA JORGE

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ELEMENTOS DE MADEIRA LAMELADA
PREGADA (*NAIL LAMINATED TIMBER*)**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte da Silva

Guaratinguetá – SP
2025

J82c

Jorge, Carlla Camilly Verneque Cordeiro de Moura
Contribuição ao estudo de elementos de madeira
lamelada pregada (*Nail Laminated Timber*) / Carlla Camilly
Verneque Cordeiro de Moura Jorge – Guaratinguetá, 2025.
90 : il.
Bibliografia: f. 87-90

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte da Silva

1. Estruturas de madeira (Construção civil).
2. Painéis de Madeira. 3. Construção civil. I. Título.

CDU 624.011.1(043)

Luciana Máximo Bibliotecária
CRB-8/3595

CARLLA CAMILLY VERNEQUE CORDEIRO DE MOURA JORGE

**Contribuição ao estudo de elementos de Madeira Lamelada Pregada (Nail
Laminated Timber).**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestra em Engenharia

Data da defesa: 28/07/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JULIO CESAR MOLINA**
Data: 28/07/2025 16:09:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
Orientador - USP

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA**
Data: 28/07/2025 16:22:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA
Universidade Federal de Rondônia

Documento assinado digitalmente
 **VINICIUS BORGES DE MOURA AQUINO**
Data: 28/07/2025 16:53:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.Dr. VINICIUS BORGES DE MOURA AQUINO
UNESP

DADOS CURRICULARES

CARLLA CAMILLY VERNEQUE CORDEIRO DE MOURA JORGE

NASCIMENTO	02 de julho de 1999 – Itapeva / SP
FILIAÇÃO	José Carlos de Moura Jorge Eloina Graciela Verneque Cordeiro de Moura
2017/2021	Engenharia Industrial Madeireira Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho de pesquisa e para a conclusão bem-sucedida da minha dissertação de mestrado. Em especial, quero agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Julio Cesar Molina, pela orientação excepcional, paciência e apoio ao longo de todo o processo. Suas valiosas sugestões e *insights* foram fundamentais para a qualidade deste trabalho. Também expresso minha gratidão à instituição de ensino, Unesp, por proporcionar recursos e ambiente propício para a realização deste estudo. Agradeço ainda ao financiamento da CAPES e à doação de madeira da Solução Engenharia em Madeiras, que foram essenciais para a viabilização desta pesquisa.

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

“A engenharia é o mais sublime dos ofícios,
pois enquanto os outros artesãos buscam
apenas criar beleza, o engenheiro procura a
beleza na utilidade”

James Eads

RESUMO

O mercado da construção civil está em plena efervescência, com a madeira industrializada destacando-se como uma opção sustentável e eficiente para projetos rápidos. Produtos como a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) e a Madeira Lamelada Pregada (MLP) têm ganhado destaque na construção civil. Este trabalho teve o objetivo efetuar um levantamento bibliográfico sobre a normalização relativa à MLP, e também de desenvolver testes experimentais associados a simulações numéricas os quais poderão embasar futuras revisões da norma ABNT NBR 7190 : 2022. Para tanto, foram fabricadas vigas de (MLP) utilizando lamelas de *Pinus ssp* com 8 a 10 anos de idade, doadas pela Solução Engenharia em Madeira. As lamelas doadas, tinham dimensões de 0,05 x 0,10 x 1,50 m e 0,05 x 0,10 x 0,30 m, foram classificadas visual e mecanicamente, para determinação de suas principais propriedades mecânicas, e posteriormente foram unidas para a confecção de vigas de MLP, com fixação por pregos, e sobre uma a superfície superior de cada viga foi fixada uma chapa de compensado para aumentar a rigidez de transporte do elemento. Foram assim confeccionadas oito amostras de vigas para os ensaios de flexão (sendo seis com chapa compensada e 2 sem a chapa compensada na superfície superior) e seis corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto (*double shear*). O ensaio dos corpos de prova de cisalhamento revelou um módulo de deslizamento de 1.118 N/mm para cada plano de corte obtido. A resistência média da ligação por pregos foi de 1,65 kN, valor este que foi inferior ao valor obtido por Silva e Trindade (2023). A rigidez média EI das vigas foi igual a 526 GPa, a resistência última a flexão foi de 29 MPa. A classificação visual das lamelas influenciou mais nos resultados de resistência do que a adição da chapa compensada utilizada para aumento da rigidez do sistema. A simulação numérica dos ensaios de flexão foi capaz de analisar o comportamento global do sistema através da relação força versus flecha e também identificou os aspectos localizados de interesse como a concentração de tensões nas regiões de maior solicitação do material justificando os modos de ruptura obtidos nos ensaios experimentais. Apesar da falta de literatura sobre MLP, há bases para continuar os estudos e, futuramente, padronizar e regulamentar a fabricação e aplicação da MLP.

PALAVRAS-CHAVE: Normalização. Madeira Lamelada Pregada. Estudo numérico-experimental. Caracterização do material;

ABSTRACT

The construction market is currently booming, with industrialized wood standing out as a sustainable and efficient option for fast-track projects. Products such as Cross-Laminated Timber (CLT) and Nailed Laminated Timber (NLT) have been gaining prominence in the construction industry. This study aimed to conduct a literature review on the standardization related to NLT, as well as to develop experimental tests associated with numerical simulations, which could support future revisions of the ABNT NBR 7190: 2022 standard. For this purpose, NLT beams were manufactured using *Pinus ssp lamellae* aged 8 to 10 years, donated by Solução Engenharia em Madeira. The donated lamellae, with dimensions of 0.05 x 0.10 x 1.50 m and 0.05 x 0.10 x 0.30 m, were visually and mechanically graded to determine their main mechanical properties, and were subsequently joined to create NLT beams, secured with nails. A plywood sheet was fixed to the upper surface of each beam to increase the rigidity for transportation. Eight beam samples were thus prepared for bending tests (six with plywood sheets and two without the plywood sheet on the upper surface) and six specimens were prepared for direct shear tests (double shear). The shear specimen test revealed a slip modulus of 1,118 N/mm for each shear plane obtained. The average nail joint strength was 1.65 kN, which was lower than the value obtained by Silva and Trindade (2023). The average beam stiffness EI was 526 GPa, and the ultimate bending strength was 29 MPa. Visual grading of the lamellae had a greater influence on the strength results than the addition of plywood sheets used to increase the system's rigidity. The numerical simulation of the bending tests was able to analyze the overall behavior of the system through the force versus deflection relationship and also identified localized aspects of interest, such as stress concentration in regions of higher material stress, justifying the failure modes observed in the experimental tests. Despite the lack of literature on NLT, there are foundations to continue studies and, in the future, standardize and regulate the manufacturing and application of NLT.

KEYWORDS: Standardization. Nailed Laminated Timber. Numerical-Experimental Study. Material Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edifício da Dengo na Av. Faria Lima	15
Figura 2 – <i>Nail Laminated Timber</i>	16
Figura 3 – Configuração da fixação dos pregos	20
Figura 4 – Configuração dos elementos que compõem o MLP	21
Figura 5 – Laje de MLP no edifício de 1920	23
Figura 6 – Laje de MLP ondulada da <i>Aberdeen Station</i>	24
Figura 7 – Laje de MLP	24
Figura 8 – Gabarito para montagem do MLP.	26
Figura 9 – Configuração dos pregos nas lamelas de MLP	26
Figura 10 – Processo de fabricação do MLP.	27
Figura 11 – Prova de carga do tabuleiro de ponte	28
Figura 12 – Padrão da pregação em zig zag utilizada na produção dos painéis de MLP	29
Figura 13 – Ensaio de flexão no painel de MLP	29
Figura 14 – Elemento de madeira lamelada com pregos	31
Figura 15 – Comparação dos resultados dos testes, simulação e equação	32
Figura 16 – Painel de MLP no ensaio de flexão.	33
Figura 17 – Classificação visual medição dos nós.	35
Figura 18 – Classificação visual medição da inclinação das fibras	36
Figura 19 – Classificação visual medição da fissura.	36
Figura 20 – Classificação visual medição do encurvamento	37
Figura 21 – Classificação visual medição do encanoamento.	37
Figura 22 – Classificação visual medição do torcimento.	38
Figura 23 – Classificação visual medição do arqueamento	38
Figura 24 – Classificação visual medição do comprimento do esmoado	39
Figura 25 – Classificação mecânica com ensaio de flexão	40
Figura 26 – Esquema do ensaio de flexão.	41
Figura 27 – Dimensões do corpo de prova para analisar a resistência da ligação	42
Figura 28 – Exemplo do tabuleiro lamelado protendido	47
Figura 29 – Arranjo de teste para medição do módulo de elasticidade na flexão	47
Figura 30 – Lamela com medidor de umidade M52	55
Figura 31 – Lamela avaliada na classificação visual	55

Figura 32 – Ensaio pelo método de excitação por impulso para determinação do Módulo de elasticidade...	56
Figura 33 – Vista frontal da distância dos pregos nas lamelas....	58
Figura 34 – Marcação dos pontos para receber os pregos	58
Figura 35 – Fixação das vigas de MLP.....	59
Figura 36 – Viga de MLP com chapa compensada fixada na parte superior.....	59
Figura 37 – Vista da seção transversal dos corpos de prova na flexão.....	60
Figura 38 – Corpo de prova de cisalhamento para avaliação da resistência e rigidez interlamelar com uso de painel compensado	60
Figura 39 – Corpo de prova confeccionado para os ensaios de cisalhamento com painel externo de compensado	61
Figura 40 – Ensaio de flexão em dois pontos de viga de MLP	62
Figura 41 – Ensaio de cisalhamento da ligação	63
Figura 42 – Forma de aplicação do carregamento no ensaio do corpo de prova com corte duplo	64
Figura 43 – Diagrama Força versus deslizamento.....	64
Figura 44 – Simulação numérica do MLP no RFEM	67
Figura 45 – Deslizamento limite de 5 mm	72
Figura 46 – Ruptura no nó inferior do CP2 por tração no ensaio de flexão	73
Figura 47 – Ruptura por tração inferior do CP6 no ensaio de flexão	73
Figura 48 – Ruptura por cisalhamento na LN da seção para o CP5 no ensaio de flexão	74
Figura 49 – Modo de ruptura por tração inferior no CP8 no ensaio de flexão	75
Figura 50 – Painel de MLP submetido a flexão	76
Figura 51 – Curva de calibração do modelo numérico.....	77
Figura 52 – Comparação de regiões de rompimento do MLP experimental x simulação....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos corpos de prova para ensaio de flexão.....	57
Tabela 2 – Composição dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento.....	57
Tabela 3 – Teor de Umidade das lamelas.....	68
Tabela 4 – Classificação mecânica das lamelas 0,05 x 0,10 x 1,5 m.....	68
Tabela 5 – Classificação visual das lamelas 0,05 x 0,10 x 1,5 m.....	69
Tabela 6 – Classificação visual das lamelas 0,05 x 0,10 x 0,3 m.....	69
Tabela 7 – Parâmetros obtidos a partir do ensaio de resistência da ligação dos corpos de prova	70
Tabela 8 – Módulo de elasticidade e resistências a flexão das peças de MLP.....	72
Tabela 9– Módulo de elasticidade e resistências a flexão das peças de MLP	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
DLT	<i>Dowel Laminated Timber</i>
MLC	Madeira Lamelada Colada
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada
MLP	Madeira Lamelada Pregada
MEF	Método dos Elementos Finitos
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura na flexão
NLT	<i>Nail Laminated Timber</i>
NBR	Norma Brasileira
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
VSG	<i>Visual Stress-Grading</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Altura do painel
P	Carga aplicada dentro do regime linear
k_{mod}	Coefficiente de cálculo
ν_{xy}	Coefficiente de Poisson no plano xy
ν_{xz}	Coefficiente de Poisson no plano xz
ν_{yz}	Coefficiente de Poisson no plano yz
ρ_{aparente}	Densidade aparente
$\rho_{\text{bas,m}}$	Densidade básica
L	Distância entre apoios
δ	Flecha obtida no meio do vão
b	Largura total do painel MLP
GA_{90}	Módulo de cisalhamento do elemento composto normal às fibras
E_x	Módulo de elasticidade na direção longitudinal
E_y	Módulo de elasticidade na direção radial
E_z	Módulo de elasticidade na direção transversal
G_{xy}	Módulo de elasticidade transversal no plano xy
G_{xz}	Módulo de elasticidade transversal no plano xz
G_{yz}	Módulo de elasticidade transversal no plano yz
W	Módulo resistente da seção transversal
M_{max}	Momento máximo obtido para a força última de ruptura
f_{c0k}	Resistência característica a compressão paralela as fibras
f_{vk}	Resistência característica ao cisalhamento
f_M	Resistência última a flexão
EI_{90}	Rigidez a flexão do elemento composto normal às fibras
EI	Rigidez a flexão do elemento composto
$E_{c0,m}$	Rigidez média a compressão paralela as fibras

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	18
2.1	Objetivos específicos	18
3	JUSTIFICATIVA	19
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1	Mercado da Construção civil nacional para madeira	22
4.2	Madeira Lamelada Pregada	23
4.3	Madeira Lamelada Pregada no Brasil	24
4.4	Fabricação do MLP	25
4.4.1	Matéria-prima	25
4.4.2	Montagem do painel	26
4.5	Estudos sobre a Madeira Lamelada Pregada	27
4.6	Classificação visual das lamelas	35
4.6.1	Nós	35
4.6.2	Inclinação das fibras	35
4.6.3	Fissuras	36
4.6.4	Encurvamento	36
4.6.5	Encanoamento	37
4.6.6	Torcimento	37
4.6.7	Arqueamento	38
4.6.8	Esmoadado	38
4.7	Classificação mecânica das lamelas	39
4.8	Ensaio e modelos dos corpos de prova para peças de dimensões estruturais	40
4.9	Normas brasileiras ABNT NBR 7190-4: 2022	40
4.10	Normas estrangeiras	43
4.11	Análise numérica	49
4.11.1	Software RFEM	51
4.12	Conclusões da revisão bibliográfica	53
5	MATERIAIS E MÉTODOS	55
5.1	Classificação visual e mecânica	55
5.2	Confeção dos corpos de prova para os ensaios e cisalhamento e flexão ...	57

5.3	Ensaio de flexão	61
5.4	Ensaio de cisalhamento dos corpos de prova	62
5.5	Análise numérica	65
5.6	Análise estatística dos resultados	67
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
6.1	Caracterização das lamelas	68
6.2	Ensaio de cisalhamento do corpo de prova	70
6.3	Ensaio de flexão das vigas de MLP.....	72
6.3	Simulação numérica no RFEM	76
6.4	Análise estatística do ensaio de flexão	79
7	CONCLUSÃO	80
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
9	REFERÊNCIAS	83

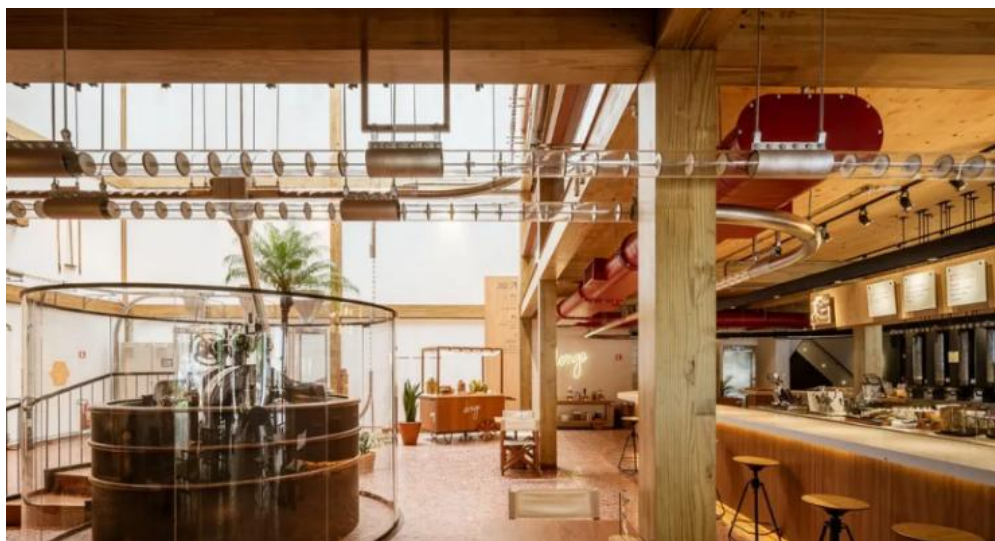
1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil está em plena efervescência, destacando a madeira industrializada como uma opção sustentável e eficiente para projetos de rápida execução. Além dos tradicionais painéis pré-moldados e elementos estruturais, a indústria produz uma variedade de derivados de madeira, facilitando o planejamento e reduzindo o tempo de montagem no canteiro de obras. Essa agilidade é uma das características mais atrativas desses produtos, aliada à pegada de carbono, o que os torna uma escolha cada vez mais popular na construção sustentável (Brandner et al., 2016; Espinoza et al., 2016).

Paulo Roberto Pupo, vice-presidente da FIEP e superintendente da ABIMCI, destacou em entrevista ao G1 em 2023 que o Brasil está próximo de adotar o *Wood Frame* como novo sistema construtivo para residências e edifícios de madeira e madeira industrializada, marcando uma mudança significativa no cenário da construção civil nacional (G1, 2023).

A madeira industrializada, como a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), já amplamente utilizada em países desenvolvidos da América do Norte e Europa, tem conquistado destaque crescente no Brasil nos últimos anos. No mercado imobiliário de alto padrão, esse produto é considerado uma das principais soluções, e o edifício da Dengo na Avenida Faria Lima (Figura 1), em São Paulo, pode ser visto como o marco inicial para a expansão da madeira industrializada no país (Pollo et al., 2023).

Figura 1 – Edifício da Dengo na Av. Faria Lima.



Fonte: Dengo chocolates (2020).

Outro produto industrializado de madeira confeccionado na forma de painel é a Madeira Lamelada Pregada (MLP), ou *Nail Laminated Timber* (sigla em inglês NLT), que é formado por lamelas de madeira fixadas com pregos (Figura 2) e pode ser utilizado como laje, piso e parede estrutural. Em painéis de laje, a utilização de pregos de madeira facilita a furação do painel para passagem de fios como também a fixação de lumiarias, uma vez que estes painéis devem ser furados para tal finalidade (Gong et al., 2019).

Figura 2 – *Nail Laminated Timber*.



Fonte: |Modificado de Meng Gong (2019).

A MLP, um tipo de painel de madeira, destaca-se por sua fabricação simples, dispensando a necessidade de equipamentos sofisticados. Além disso, pode ser elaborado com diferentes espécies de madeira e diversos tipos de conectores, como pregos metálicos e de madeira. Ao contrário de outros produtos industrializados, como a Madeira Lamelada Colada (MLC) e a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), a MLP não requer adesivos em sua composição, o que reduz uma série de exigências para sua produção (Forest Products Laboratory, 2010; FPInnovations, 2017).

Entretanto, há falta de normatização específica para este produto no Brasil, assim como escassez de pesquisas científicas nacionais sobre o tema. Portanto, encontrar literatura especializada sobre esses painéis de MLP, especialmente em relação aos modelos e corpos de prova para ensaios, e entendimento sobre o seu comportamento estrutural, é uma tarefa desafiadora.

Ao longo de mais de um século, a MLP tem sido uma escolha comum na construção de armazéns e galpões industriais em outros países. Em 2020, a empresa *Rewood Soluções*

Estruturais em Madeira, sediada em Taboão da Serra - SP, introduziu esse material no Brasil e explorou algumas aplicações. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de um maior entendimento sobre o comportamento estrutural desse produto, bem como conhecer suas respectivas aplicações.

Assim, este trabalho de pesquisa teve o objetivo de realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre o MLP, de modo a abastecer a literatura nacional sobre este tema. Objetivou também a proposição e o desenvolvimento de testes experimentais em elementos de MLP (corpos de prova de cisalhamento e flexão) para conhecimento do comportamento do sistema além de simulações numérica para uma análise detalhada do comportamento estrutural do sistema. Além disso, teve o objetivo de compreender os detalhes dos processos de fabricação desses painéis com vistas a sugerir diretrizes para ensaios e testes específicos para este produto, visando contribuir para futuras revisões da norma brasileira de estruturas de madeira, a ABNT NBR 7190: 2022, que passou recentemente por processo de revisão abrigando em seu texto vários procedimentos de ensaios para elementos de MLCC e MLC, peças estruturais, mas nenhuma recomendação para a MLP.

2 OBJETIVO

Compreender o sistema de produção, verificando as principais recomendações normativas sobre este tema e analisar o comportamento estrutural dos elementos de MLP através de estudo numérico-experimental para propor recomendações de ensaios e impulsionar a adoção e uso mais amplo desse material no Brasil.

2.1 Objetivos específicos

- Revisão da literatura disponível (nacional e internacional) para avaliar as normas e trabalhos publicados sobre o tema;
- Entendimento do processo produtivo de painéis e elementos de MLP;
- Avaliação da resistência e rigidez de corpos de prova de MLP submetidos ao cisalhamento direto;
- Avaliação da resistência e rigidez de elementos de MLP na flexão;
- Avaliação numérica do comportamento do sistema MLP na flexão, para identificação dos possíveis modos de ruptura;
- Comparação entre os resultados de ensaios experimentais e simulações numéricas realizados para os painéis MLP.

3 JUSTIFICATIVA

A utilização de elementos MLP emerge como uma alternativa promissora para ampliar as opções no campo das estruturas de madeira. Este sistema oferece facilidade e rapidez de fabricação, possibilitando a produção de painéis em diferentes tamanhos para uso em pisos, paredes e lajes, com uma elevada relação resistência/peso. Além disso, sua fabricação pode empregar diversas espécies de madeira, aproveitando a abundância de madeiras de reflorestamento no Brasil, como pinus e eucaliptos. Ainda, a fabricação deste tipo de elemento não exige a utilização de mão de obra especializada.

Os painéis de MLP estão sujeitos principalmente a esforços de flexão e cisalhamento, e não há normas nacionais específicas para este produto no Brasil, apesar de se observar seu uso emergente em soluções estruturais de edifícios de madeira no país.

Também se conhece pouco sobre o comportamento estrutural desses painéis na flexão, e sobre os parâmetros de configuração ideais, como espaçamento dos pregos e tipo de madeira mais indicada. Também não se conhece exatamente quais são os tipos de corpos de prova e de ensaios para uma correta análise do seu comportamento, uma vez que a literatura nacional sobre este tema está em fase de desenvolvimento no país.

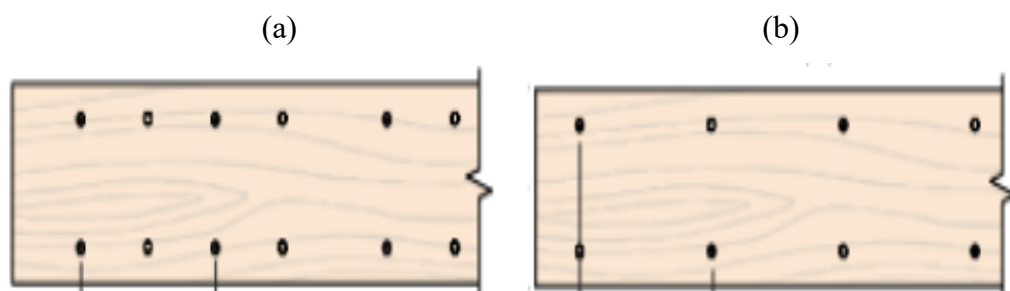
Portanto, este trabalho de pesquisa dará início a uma série de estudos a serem desenvolvidos na UNESP de Itapeva, em colaboração com a UNESP/Guaratinguetá, visando aprofundar o entendimento do comportamento deste produto industrializado, cujos resultados poderão servir de base não somente para trabalhos futuros mas também para futura revisão da norma ABNT NBR 7190: 2022.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Madeira Lamelada Pregada – MLP ou sigla em inglês NLT (*Nail Laminated Timber*) faz parte dos produtos industrializados comercializados na forma de painéis de madeira. As lamelas de madeira que compõem esse produto são de madeiras maciças (coníferas ou folhosas) sendo essas lamelas posteriormente unidas com pregos (de aço ou de madeira), tornando este um painel estrutural formado por lamelas longitudinais. Sobre essas lamelas fixa-se outro painel (geralmente compensado ou OSB – *Oriented Strand Board*). Esse sistema é aplicado como pisos, lajes, telhados, paredes ou também pode ser utilizado em poços de elevadores e escadas.

Para fabricação desse painel não existem impedimentos quanto a escolha da espécie de madeira, sendo possível a utilização de qualquer espécie. A lamela normalmente possui espessura igual ou menor que 50 mm, pois sua fixação é feita com prego e espessuras maiores exigiriam pregos de maior comprimento que acarretariam em maiores custos. A fixação desses pregos pode ser feita de duas formas, dependendo do comprimento do prego e da distância entre eles (Figura 3), e tipo de fixação pode influenciar no dimensionamento do painel, pois para cada configuração de espaçamento entre pregos tem-se uma resistência e rigidez específicos para a ligação. O módulo de deslizamento K representa a rigidez da ligação pregada e é dado pela relação entre força (F) e deslocamento (δ) obtidos na curva de resposta do ensaio da ligação.

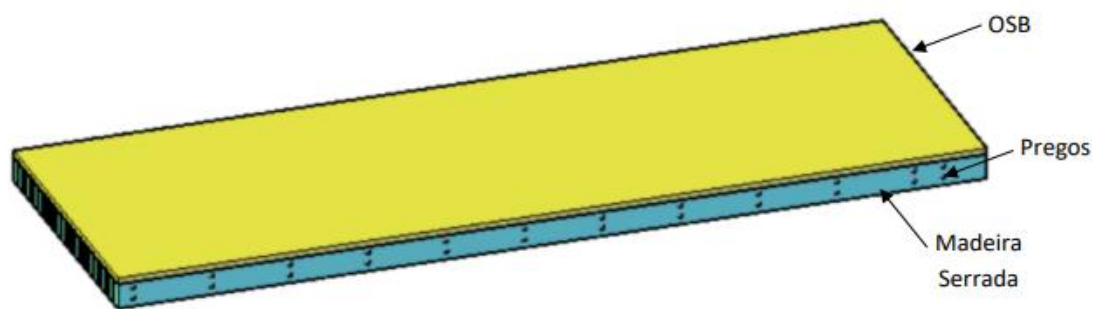
Figura 3– Configuração da fixação dos pregos: (a) Distância entre pregos maior que 140 mm; (b) Distância entre pregos menor que 140 mm.



Fonte: *NAIL- Laminated Timber* (2017).

Para garantir maior rigidez deste produto durante o seu içamento e transporte, como também para aumentar a sua rigidez como um todo, utiliza-se uma placa de OSB ou de compensado pregados junto às lamelas, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4– Configuração dos elementos que compõem o MLP.



Fonte: Jorge (2022).

Caso o painel não seja utilizado como elemento estrutural e sim somente como fechamento ele não exige necessariamente uma classificação visual rigorosa para as lamelas que o compõem. No entanto, se o painel MLP for utilizado para fins estruturais, as lamelas precisam ser classificação mecânica e visualmente utilizando-se as recomendações das normas ABNT NBR 7190-2: 2022 e ABNT NBR 7190-4: 2022. A classificação mecânica permite o conhecimento das propriedades mecânicas da madeira utilizada na confecção dos painéis e a classificação visual indica a classe de defeitos que a madeira se enquadra.

Esse produto tem uma técnica de fabricação bem antiga, que em contrapartida traz uma arquitetura bem moderna e atraente. O painel MLP vem conquistando o mercado da construção civil à medida que suas vantagens são exaltadas e comentadas (Crespell & Gagnon, 2010). As madeiras que constituem o painel de MLP, são geralmente madeiras de reflorestamento (pinus e eucalipto), que têm pegada de carbono, sendo este um produto sustentável e compatível com as novas exigências ambientais (Brandner et al., 2016). Além de ser estruturalmente um painel de aplicação em grandes edificações.

Uma das maiores vantagens deste produto é a facilidade na fabricação, pois este pode ser fabricado com matéria prima de reflorestamento, utilizando espécies comuns de madeira da região e também do Brasil, além de simples equipamentos para sua pregação.

No entanto, mesmo com suas diversas vantagens esse produto ainda não é tão comumente utilizado no país. A madeira que ainda continua sendo a coadjuvante no setor da construção civil, utiliza produtos como MLC (Madeira Lamelada Colada) e MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada) em sua grande maioria, que são elementos compostos por lamelas coladas de madeira e tem alto custo de produção devido ao custo dos adesivos (Brandner et al., 2016). Os painéis de MLP aumentam as soluções estruturais em madeira e suas propriedades e vantagens devem ser exploradas no ramo da construção civil. A MLC e a

MLCC possuem normas específicas estrangeiras e algumas regulamentações brasileiras apresentadas pela ABNT NBR 7190: 2022. O método de ensaio ABNT NBR 7190-6: 2022 e o ABNT NBR 7190-7: 2022 são referentes a MLC e a MLCC, respectivamente. Essas normas apresentam os procedimentos de ensaios em corpos de prova para a avaliação da qualidade de colagem (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 2022a, 2022b).

Diante disso, é necessário um aprofundamento maior no conhecimento da MLP para entendimento de suas vantagens, limitações e, principalmente, comportamento estrutural.

4.1 Mercado da Construção civil nacional para madeira

Mello (2007) relata o uso de madeira na construção civil para diversas finalidades, partindo de usos temporários para definitivos. Sua aplicação como produto temporário está nos cimbramentos, andaimes e escoras, finalidades estas que são baseadas no auxílio da montagem de edificações de alvenaria. Já como definitiva a madeira é aplicada em estruturas de coberturas, estrutura da edificação, esquadrias, mobiliário, forros e pisos.

O panorama da madeira na construção civil mudou nas últimas décadas, e a madeira industrializada vem ganhando destaque no mercado imobiliário. A madeira entrou definitivamente como concorrente de estruturas de aço e concreto.

De acordo com Theodoraski (2023), a madeira industrializada é a nova tendência na construção civil, pois o produto é um material leve, resistente e sustentável. Com a constante busca por alternativas sustentáveis nesse setor esse produto vem para a descarbonização dos empreendimentos.

Segundo Theodoraski (2023), quando se fala em revolucionar a forma de construir, a madeira industrializada é uma grande aposta. Afinal, o material entrega estabilidade, resistência, leveza, precisão, sustentabilidade e, sobretudo, velocidade, ao passo que as peças são pré-fabricadas, fato que otimiza o período de construção e minimiza os desperdícios.

Outro aspecto que apoia esse argumento é o investimento e instalação de fabricas de madeira industrializada. Atualmente o país possui dezenas de pequenas fabricas de madeira industrializada e recentemente foi inaugurando a primeira fábrica com produção a nível de exportação a Urbem.

Bonatelli (2021) relata que Startup Urbem recebeu aporte de 103 milhões, sendo que o dinheiro foi aplicado na montagem da fábrica em Tamandaré (PR). A fábrica com capacidade de produzir 100 mil metros cúbicos de madeira abastecerá 500 mil metros quadrados de obra.

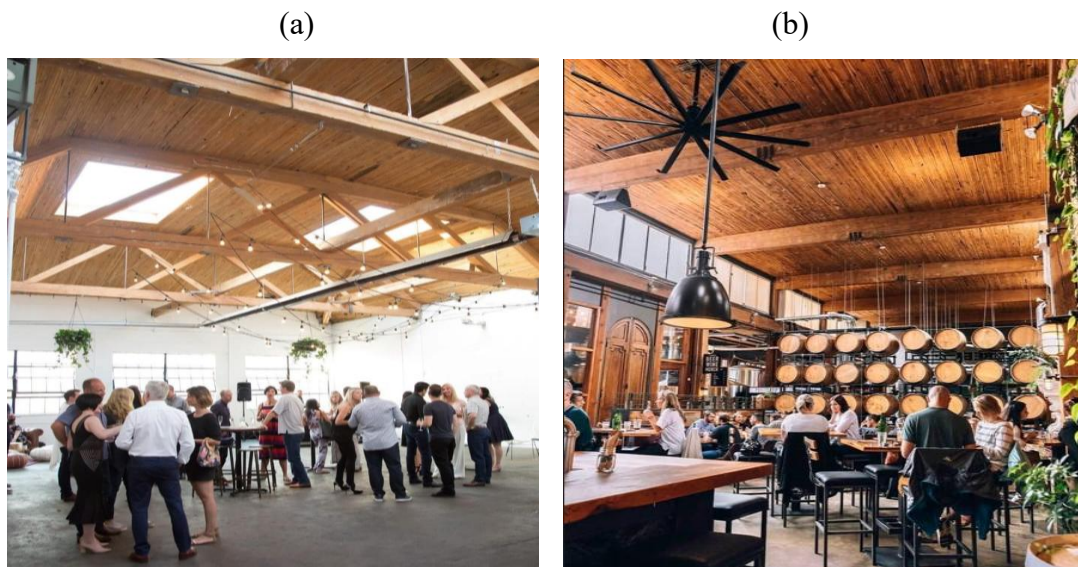
Além disso, algumas incorporadoras estão em fase de desenvolvimento de empreendimentos com esse material. Um caso desses é a Noah, empresa já citada que planeja lançar um prédio de 11 andares na Vila Madalena em São Paulo (SP).

Outras empresas nacionais como Rewood e CrosLam vêm a mais de uma década incluindo a madeira na construção civil nacional. Ambas possuem uma grande gama de obras em madeira espalhadas por todo país.

4.2 Madeira Lamelada Pregada

O MLP foi usado inicialmente na construção de armazéns e edifícios de grande porte. Em 1920, em Vancouver, a edificação da Figura 5a foi feita inicialmente para abrigar uma fábrica de aço. Atualmente esse edifício abriga uma vinícola, a *Vancouver Urban Winery* e o edifício com mais de um século continua sendo usado para refugiar a fábrica da vinícola, loja e espaço de eventos Figura 5b.

Figura 5– Laje de MLP no edifício de 1920: (a) Espaço de eventos *Vancouver Urban Winery*; (b) Loja e fábrica *Vancouver Urban Winery*.



Fonte: *Vancouver Urban Winery* (2020).

O MLP possibilita uma concepção estrutural dinâmica inclusive com o uso de estruturas curvas. Um exemplo disso é a *Aberdeen Station* em *Richmond BC* (Figura 6).

Figura 6– Laje de MLP ondulada da *Aberdeen Station*.



Fonte: *Perkins & Will* (2009).

4.3 Madeira Lamelada Pregada no Brasil

Exemplos de edificações que utilizam o painel MLP são o *Stand* da Caconde localizada em São Paulo (Figura 7a), a outra trata-se de um *Showroom* de Vendas de um empreendimento também localizado em São Paulo (Figura 7b).

Figura 7– Laje de MLP: (a) *Stand* da Caconde; (b) o *Showroom* de Vendas do Empreendimento.

(a)



(b)



Fonte: *Rewood* (2021).

4.4 Fabricação do MLP

O guia de construção NAIL- *Laminated Timber* (2017) afirma que a espécie de madeira afeta a resistência e aparência do MLP. Sendo assim, o referido documento recomenda que para a fabricação do MLP deve ser escolhida uma espécie de madeira de acordo com o clima da região, e se trata de aplicação interna ou externa, pois diferentes espécies de madeira absorvem e liberam água em graus diferentes. Além disso, tem a questão estética em que espécies como as coníferas possuem uma quantidade substancial de nós se comparadas às folhosas (dicotiledôneas). Nessa comparação de coníferas e folhosas tem-se também a diferença da densidade, em que as coníferas possuem uma densidade menor, o que facilita no corte e a resistência ao pregar.

No entanto, de forma geral, não se tem restrição de espécies de madeira, mas sim para espécies de madeira como as coníferas é necessária a classificação visual, além da mecânica. Em outras palavras, todas as espécies de madeira podem ser utilizadas na fabricação do MLP. O que vai poderar na escolha da espécie a ser utilizada é o valor econômico, a aplicação do painel (externo ou interno), a trabalhabilidade da madeira, e a disponibilidade da mesma de forma a torna-la acessível para aquisição.

De modo geral, para a fabricação do MLP é importante se atentar a três pontos principais: a matéria-prima madeira, o conector (tipo e espaçamento dos pregos), e a forma de montagem do painel.

4.4.1 Matéria-prima

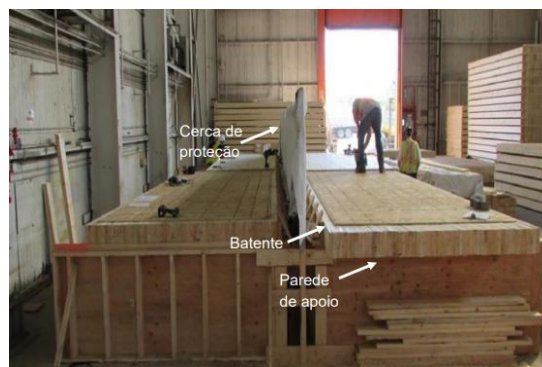
A madeira é um material heterogêneo e para cada espécie de madeira há uma composição celular diferente. Sendo assim, cuidados especiais relativos à classificação visual para as coníferas devem ser considerados. Para os conectores (pregos) recomenda-se que estes sejam galvanizados para que não enferrujem (recomenda-se pregos de aço com haste lisa). A madeira de reflorestamento pode ser utilizada e são preferidas na fabricação do MLP já que esse produto não se restringe a nenhuma espécie.

Além dos conectores metálicos podem ser aplicados também conectores de madeira, que são pregos feitos em madeira dura que se camuflam no painel e diminuem a densidade do painel, já que os pregos de aço que possuem uma alta densidade acabam por aumentar o peso do painel. Além disso, os pregos de madeira permitem a posterior furação do painel para colocação de fiação se necessário, sem a preocupação de quebra das brocas.

4.4.2 Montagem do painel

Para a montagem do painel o mesmo deve ser feito em um gabarito como o da Figura 8. O gabarito é composto por paredes de apoio na altura da cintura do trabalhador com um batente reforçado na ponta que receberá constantes golpes de pressões. É importante que ele esteja sempre no gabarito previsto, pois ele que determinará o esquadro do painel. É importante também a instalação de uma cerca de proteção para que pregos perdidos não voem e não prejudiquem a segurança dos colaboradores da empresa.

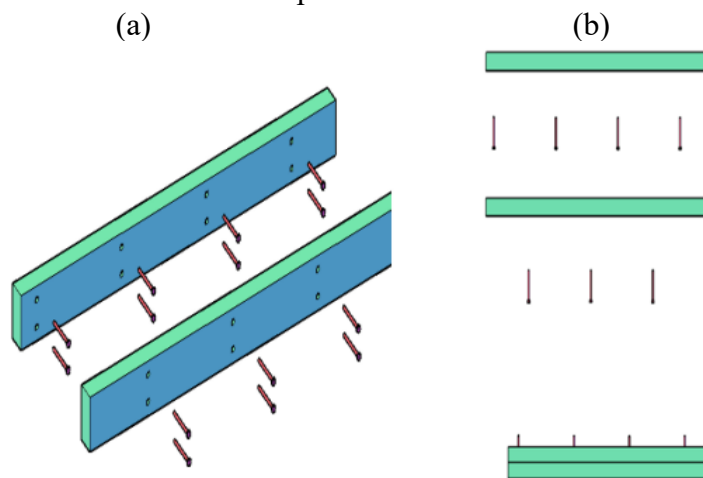
Figura 8– Gabarito para montagem do MLP.



Fonte: NAIL- Laminated Timber (2017).

A montagem do painel se inicia com as lamelas de madeira aparelhadas e demarcadas com a localização do prego que é intercada como mostrado na Figura 9.

Figura 9– Configuração dos pregos nas lamelas de MLP: (a) Perspectiva; (b) Vista superior.



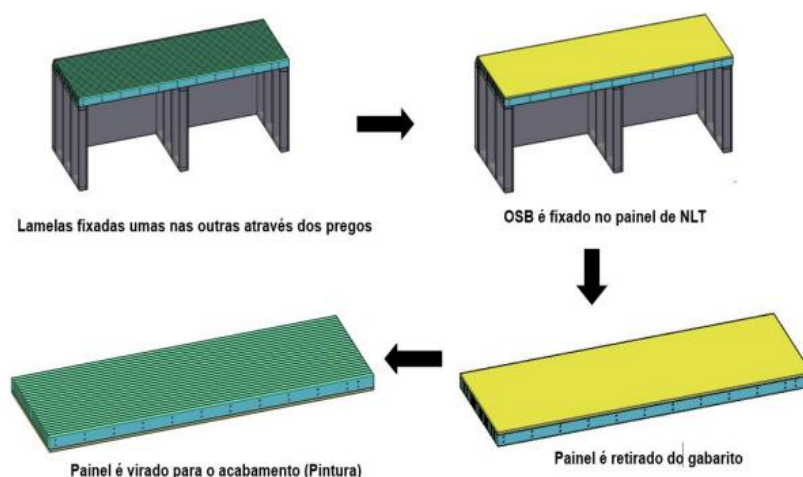
Fonte: Jorge (2022).

Os pregos são utilizados como fixadores tanto na junção das lamelas como na junção do painel MLP com o OSB ou compensado e devem ser galvanizados para que não enferrujem e nem manchem a madeira se entrarem em contato com umidade. É recomendado que seja utilizado pregos de aço galvanizados com haste lisa. Podem ser utilizados pregos de 76 mm de comprimento e diâmetro de 3,76 mm e pregos de 76 mm de comprimento e diâmetro de 3,33 mm (NAIL-Laminated Timber, 2017).

As configurações de pregagem podem variar conforme a aplicação, sendo comuns as disposições em fileira simples, fileira dupla, zigue-zague (alternada) e agrupada, devendo-se respeitar os espaçamentos mínimos e afastamentos das bordas recomendados pelas normas para garantir a capacidade de resistência e evitar fissuras na madeira. De acordo com a ABNT NBR 7190:2022, os espaçamentos mínimos são: 7 vezes o diâmetro do prego (7d) entre pregos na mesma linha de fibras, 4d entre linhas de pregagem, 10d da borda paralela às fibras e 5d da borda perpendicular às fibras.

A montagem dos painéis é iniciada com as lamelas sendo colocadas no gabarito (suporte tipo bancada) e fixadas uma a uma até o painel atingir a largura desejada. Após isso, o painel de OSB ou compensado é fixado sobre as lamelas pregadas para manter a estabilidade do painel de MLP como um todo. Uma observação importante é que o painel de MLP de lamelas serradas pregadas não deve ser movimentado sem antes ser fixado ao painel de OSB ou compensado. Ao fim desse processo, o painel é retirado do gabarito e pode receber o acabamento desejado na superfície que ficará exposta (Stain e Verniz). A Figura 10 ilustra o posicionamento do painel sobre o gabarito de suporte (tipo bancada) e o processo de pregagem e fixação do painel OSB ou compensado.

Figura 10– Processo de fabricação do MLP.



Fonte: Jorge (2022).

O acabamento do painel de Madeira Lamelada Pregada depende da exposição e do uso previsto da estrutura. Em ambientes internos, geralmente é mantido o aspecto natural da madeira, com lixamento e aplicação de stain à base de óleo ou água, que penetra nas fibras e oferece proteção contra umidade e realce do aspecto estético (NAIL-Laminated Timber, 2017). Para áreas externas ou sujeitas à umidade, recomenda-se stain com aditivos para proteção contra raios UV, fungos e bolores, preferencialmente com pigmentação para maior durabilidade. Produtos comumente utilizados incluem stains como **Cetol Deck** (base óleo) ou **Spar Urethane** (base água). Em aplicações onde a estrutura precisa atender a requisitos de resistência ao fogo, é indicada a aplicação de retardantes de chama por impregnação ou revestimentos superficiais com vernizes intumescentes, conforme normas como **NFPA 703 – Standard for Fire-Retardant-Treated Wood** e **ABNT NBR 9442 – Reação ao fogo de produtos de construção**. Esses produtos, como o **verniz intumescente Promatect®** ou **Nullifire®**, expandem sob altas temperaturas, formando uma barreira protetora. A escolha do acabamento deve considerar as exigências normativas, a exposição do material e a manutenção periódica para garantir durabilidade e segurança.

4.5 Estudos sobre a Madeira Lamelada Pregada

Widmann (2001) decidiu inovar e realizar um estudo sobre o sistema MLP parafusado para tabuleiro de pontes, utilizando parafusos em vez de pregos para fixar as lamelas do painel. O autor desenvolveu esse estudo com o objetivo de aplicar o painel como tabuleiro de ponte, com comprimentos variando de 3,5 m a 5,0 m, ou seja, o material foi utilizado de forma estrutural. O painel utilizado pelo autor tinha uma largura de 400 mm. Cada lamela do painel do tabuleiro tinha 6 cm de espessura e altura aproximada entre 28 cm a 38 cm, sendo feita de madeira Abeto. Para a fixação, foram utilizados parafusos ($\varnothing$ 7 mm – 170 mm) de alta resistência, e a madeira foi tratada com produto preservante. Todo o painel MLP do tabuleiro da ponte foi construído e analisado em laboratório e, posteriormente, levado para a obra. O autor realizou testes de flexão e carga *in loco* para avaliar as propriedades mecânicas do painel. Para avaliar a flexão, ele registrou a deflexão de cada lamela, tomando como referência a parte central das deflexões dos elementos confeccionados. A rigidez à flexão foi determinada na seção central da viga, sem a influência das forças de cisalhamento. A relação entre o vão (L) e a altura (h) dos painéis MLP (L/h) foi maior que 21. Os momentos fletores obtidos nas cargas de ruptura variaram entre 3 kN.m e 4 kN.m. Nos testes de carga

realizados no tabuleiro, foi considerado um caminhão *truck* posicionado na posição mais desfavorável (centro do vão), e a deflexão obtida foi de 9 mm, considerando o limite de $L/550$. A Figura 11 mostra os detalhes do teste de carga realizado in loco no tabuleiro de uma das pontes estudadas.

Figura 11– Prova de carga do tabuleiro de ponte.

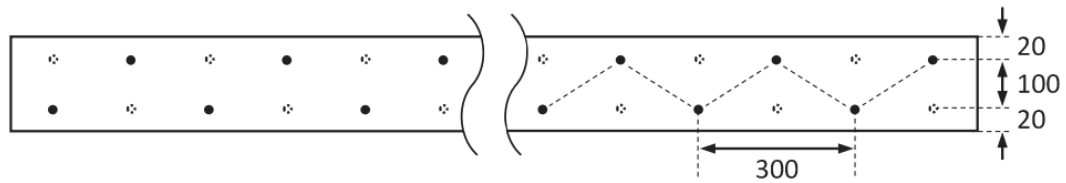


Fonte: Widman (2001).

Derikvand *et al.* (2019) analisaram as propriedades de flexão de curto e longo prazo do MLP de eucalipto. O estudo foi realizado com painéis estruturais de madeira lamelada pregada com diferentes comprimentos de vão, utilizando o *Eucalyptus nitens* de crescimento rápido de 16 anos, obtido ao norte da Tasmânia, na Austrália. As lamelas tinham espessura e largura de 35 mm e 140 mm, respectivamente, e comprimentos de 2600 mm e 3600 mm.

O *E. nitens* possuía uma densidade de $480,58 \pm 49,46 \text{ kg/m}^3$. Além disso, foi realizada uma classificação visual da madeira com base na norma australiana AS 2082 (2007) - *Madeira visualmente classificada por tensão para fins estruturais*, que determinou a madeira como grau F. As lamelas foram submetidas ao ensaio de flexão não destrutivo, utilizando como base a norma australiana AS/NZS 4063.1. Os painéis de MLP foram construídos com oito lamelas, utilizando pregos de 3,5 mm de diâmetro e 75 mm de comprimento. O sistema de pregagem utilizado foi o zigue-zague com duas fileiras (Figura 12) e examinados sob carga de flexão de quatro pontos (Figura 13).

Figura 12 – Padrão da pregação em zig zag utilizada na produção dos painéis de MLP.



Fonte: Derikvand *et. al.* (2019).

Figura 13 – Ensaio de flexão no painel de MLP.



Fonte: Derikvand *et. al.* (2019).

Os níveis de carga dentro do regime linear para testar a rigidez dos elementos de MLP com comprimento de 2600 mm e 3600 mm foram 11,77 kN e 6,87 kN, respectivamente. Os módulos de elasticidade na flexão (MOE) obtidos para esses painéis foi calculado pela equação (1)

$$MOE = \frac{23L^3(F_2 - F_1)}{108bd^3(W_2 - W_1)} \quad (1)$$

Onde:

b e d são a espessura e a largura das placas (mm);

L é o comprimento do vão (mm);

F2 e F1 foram respectivamente os níveis de carga aplicada entre 40% e 10% da carga última máxima de ruptura em (N);

w2 e w1 foram os respectivos são os deslocamentos (mm) referentes às cargas F2 e F1.

O MOE real das placas foi comparado com o valor do MOE das lamelas obtidos a partir da classificação mecânica não destrutiva. A deflexão máxima sob uma carga imposta uniformemente distribuída de até 3 kPa (ou 0,84 kN/m para a largura do painel de 280 mm) não deveria exceder $L/300$. Os autores obtiveram nesse estudo valores de MOE variando entre 9,27 GPa e 11,81 GPa com base na utilização da equação (1).

Foi avaliado o desempenho do método VSG (*Visual Stress-Grading* que estima a qualidade estrutural de acordo com critérios visuais específicos como tamanho de nós) na estimativa do MOE das lamelas de *E. nitens*, verificando-se a credibilidade do modelo de regressão simples ao prever o MOE dos painéis MLP. Isso foi determinado usando o MOE médio das placas obtido tanto do método VSG quanto do teste de flexão de quatro pontos como regressores insubstituíveis. A influência das condições ambientais no comportamento a longo prazo dos painéis também foi avaliada sob cargas de flexão de serviço. Com base nos resultados obtidos, foram tiradas as seguintes conclusões:

O método padrão VSG atual resultou em uma precisão pobre de menos de 34% na previsão do MOE real das lamelas individuais da plantação *E. nitens* manejada com fibras. O MOE dos painéis MLP não pode ser estimado adequadamente usando os resultados do VSG.

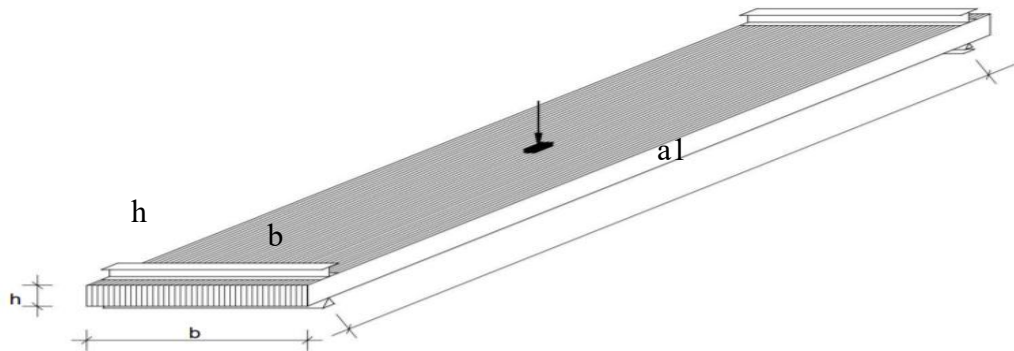
Um modelo de regressão linear foi desenvolvido neste estudo com base no MOE real das placas como o único regressor que poderia prever o MOE dos painéis MLP com média superior a 98%

Todos os painéis de teste construídos da plantação *E. nitens* gerenciada com fibra passaram com sucesso nos requisitos de manutenção de curto prazo para o limite de deflexão de $L/300$. Foi desenvolvido um padrão de laminação que resultou em um notável coeficiente médio de variação de cerca de 2,6% no MOE flexural dos painéis MLP. Esse coeficiente de variação foi obtido a partir de um total de nove painéis neste estudo que foram construídos com precisão e cuidado. Esse padrão de laminação pode ser usado para personalizar o MOE dos painéis MLP e maximizar o uso de placas de menor qualidade em suas construções.

Kramer e Blass (2001) analisaram a capacidade de carga do MLP sob cargas concentradas, tendo o objetivo de formular equações de projeto para a rigidez à flexão, para as tensões de flexão das lamelas, e para os efeitos de ação dos pregos. Esse estudo foi feito através de simulações computacionais, e na simulação o painel foi simulado como viga apoiada (Figura 14) com vão foi de 3,6 m, sendo que a profundidade das lamelas variou de 140 mm, 160 mm e 180 mm. A largura do painel variou de 30 mm, 35 mm e 40 mm,

considerando-se um total de 30 lamelas. As equações de projeto foram definidas através da simulação de muitos elementos de madeira lamelada pregada.

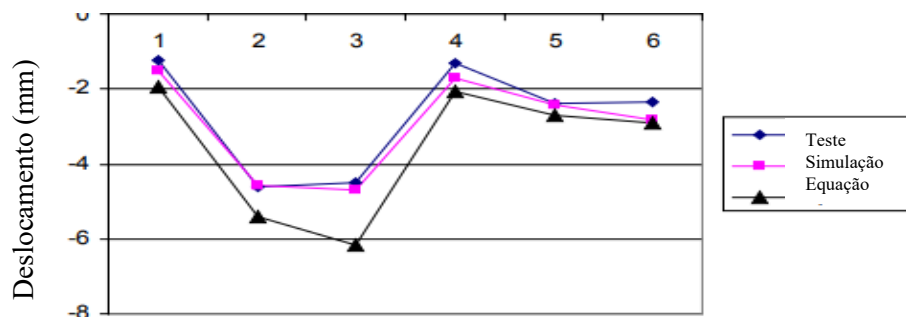
Figura 14 – Elemento de madeira lamelada com pregos.



Fonte: Kramer e Blass (2001).

Nestas simulações, os parâmetros (vão/altura do elemento), o diâmetro dos pregos e o espaçamento dos pregos variaram. As simulações foram feitas com base de valores realistas de rigidez das lamelas e dos pregos. Para garantir resultados estatisticamente confiáveis, 36 sistemas diferentes de madeira lamelada pregada foram simulados. Cada sistema de elementos de madeira lamelada pregada foi simulado 500 vezes. As equações de projeto foram derivadas dos valores de frações de 95% e dos valores médios de 18.000 simulações. Os resultados das equações de projeto foram comparados com os resultados dos testes e demonstrados boa concordância entre si (Figura 15).

Figura 15 – Comparação dos resultados dos testes, simulação e equação.



Fonte: Kramer e Blass (2001).

Como resultado os autores obtiveram a fórmula para o cálculo da tensão máxima de flexão das lamelas no MLP sob uma carga concentrada no meio do vão (Equação 2).

$$\sigma_B = \frac{M}{W_{ef}} \quad (2)$$

$$M = \frac{F \times l}{4} \quad (3)$$

Onde:

M é o momento fletor (mm);

F é a carga concentrada no meio do vão (N);

l é o vão entre apoios (mm);

$$W_{ef} = \frac{t \times h \times l}{4,5 \times a_1^{0,3}} \quad (4)$$

Onde:

w_{ef} é o módulo de resistência seção efetiva (mm³);

t é a largura do painel (mm);

h é a altura do painel (mm);

l é o vão entre apoios do painel (mm);

a₁ é o espaçamento do painel (mm);

Também obtiveram a carga dos pregos (Equação 5) e a deslocamento do painel (Equação 6).

$$F_{Na} = F \times \frac{l^{2/3} \times a_1^{0,3}}{85} \quad (5)$$

$$v = \frac{F \times L^3}{48 \times E \times l_{ef}} \quad (6)$$

$$l_{ef} = \frac{t \times h^3 \times l^{0,86}}{0,9 \times a_1^{0,4}} \quad (7)$$

Herberg (2018) avaliou em sua pesquisa se o MLP poderia ser fabricado a partir de madeira roliça de pequeno diâmetro. Cada espécie foi fabricada com vários tipos de fixadores, padrões de espaçamento de fixadores, e localizações de juntas e teores de umidade. O autor também determinou experimentalmente a flexão do MLP. Cada amostra foi testada para determinar a carga máxima aplicada, correspondente deflexão e módulo de elasticidade (MOE) quando submetido a estática (Figura 16).

Figura 16 – Painel de MLP no ensaio de flexão.



Fonte: Herberg (2018).

Além disso, o autor também verificou a configuração específica da madeira e do fixador que produziu um produto acabado econômico. Como conclusão o autor comprovou que as laminações de madeira produziram uma maior resistência à flexão do que as juntas de topo colocadas em uma forma organizada e simétrica. Além disso, o fixador de espécie MLP junto com os parafusos de estrutura multiuso exibiram a maior resistência à flexão e a maior deflexão na carga máxima aplicada dos três tipos de fixadores. O MOE medido experimentalmente foi semelhante entre os três tipos de fixadores, mas muito menor para as espécies construídos com uma configuração simétrica em comparação com amostras construídas com juntas de topo em um padrão aleatório.

Ogunrinde (2019) examinou o efeito de diferentes fixadores (prego e cavilha de madeira), com diferentes padrões de fixação (reta e zigue-zague). Para isso, foram realizadas três fases de pesquisa. Na primeira fase, foi examinada a capacidade de retirada das cavilhas de madeira em DLT (*Dowel Laminated Timber*) em termos de diâmetro do furo piloto e inchaço do pino. Foram utilizados substrato de madeira *Spruce-Pine-Fir* e cavilhas de madeira de bordo com 6 mm de diâmetro. Os resultados mostraram que o grupo que fez furos

piloto de 5 mm e utilizou cavilhas com 1% de umidade teve a maior capacidade de retirada, de 507 N, que foi 87% maior do que o grupo que fez furos piloto de 6 mm e utilizou cavilhas com 15% de umidade. Na segunda fase, foram estudadas as propriedades de flexão de amostras de madeira laminada de 3 camadas conectadas por pregos e cavilhas de madeira, além de coladas com adesivo. O espaçamento de fixação e o tipo de fixador também foram examinados. Os resultados dos testes de flexão mostraram que as amostras NLT (*Nail Laminated Timber*) com espaçamento de 60 mm tiveram um MOE (Módulo de elasticidade) médio de 10,45 MPa, que foi apenas 2% e 1% maior do que os espaçamentos de 85 mm e 110 mm, respectivamente. Já o MOR (Modulo de Ruptura) médio foi de 75 MPa, que foi 9% e 4% maior do que os espaçamentos de 85 mm e 110 mm, respectivamente. Em relação ao tipo de fixador, o DLT teve um MOE médio de 10.575 MPa e MOR de 78 MPa, que foram 6% e 4% superiores ao NLT, respectivamente. O padrão zigzague teve melhor desempenho do que o padrão direto para o DLT. As descobertas também revelaram que o NLT tinha uma variabilidade MOE menor do que o DLT.

Na fase final, foram investigadas as propriedades mecânicas de amostras em escala real de 7 camadas dos tipos de feixe NLT, DLT e GLT (*Glue Laminated Timber* ou *Glulam*), com base nos resultados da segunda fase. Os fatores considerados foram o espaçamento entre fixadores (250 mm e 450 mm), tipos de fixador (pregos e cavilhas de madeira) e padrão de fixação (pregos paralelos e inclinados). Os resultados dos testes de flexão mostraram que o grupo que utilizou pregos com 89 mm de comprimento e espaçamento de 250 mm teve um MOE e MOR médios de 11.724 MPa e 34 MPa, respectivamente, que foram 4% e 9% maiores do que o grupo que utilizou pregos com 102 mm de comprimento e espaçamento de 450 mm, conforme recomendado pelo Padrão Canadense CSA O86:19. As vigas NLT tiveram um MOE médio de 11.534 MPa e MOR de 32 MPa, que foram 2% e 16% maiores do que o DLT, respectivamente. Não houve diferença significativa entre os padrões de pregagem paralelos e inclinados. Este estudo contribuiu para a compreensão do desempenho.

4.6 Classificação visual das lamelas

A classificação visual pode ser feita com base nas recomendações da norma ABNT NBR 7190-2: 2022 – Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. A classificação visual busca separar as peças de melhor qualidade para a confecção do elemento estrutural.

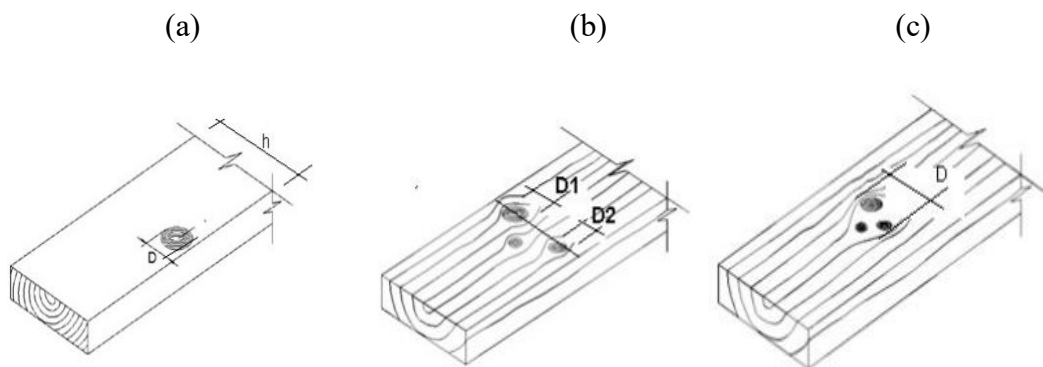
Nessa classificação as peças de madeira são separadas por classes: 1, 2 e 3, sendo agrupadas na classe 1 as peças de melhor qualidade visual e na classe 3 as peças com qualidade inferior. São avaliados os seguintes itens na classificação visual.

4.6.1 Nós

Os nós são divididos em nós soltos e firmes, sendo que a ocorrência de nós soltos ou vazados são motivos para descarte na aplicação estrutural.

Os nós são avaliados em duas faces, assim sendo é mensurado o nó mais crítico, sendo o nó com maior diâmetro ocupando maior porcentagem da largura ou da espessura (Figura 17).

Figura 17 – Classificação visual medição dos nós: (a) Medição do nó em uma face; (b) Conjunto de nós; (c) Nós individuais próximos.

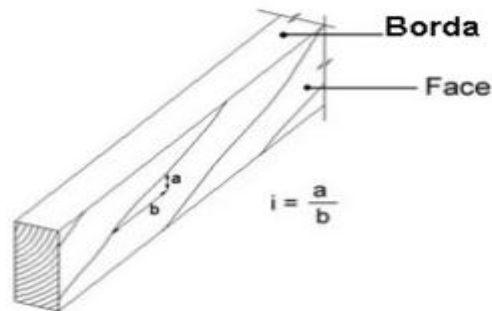


Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

4.6.2 Inclinação das fibras

A inclinação das fibras (i) é avaliada ao longo das faces da peça, na zona que apresenta a maior inclinação, desconsiderando os desvios dos nós, ela é expressa em proporções Figura 18.

Figura 18 – Classificação visual medição da inclinação das fibras.

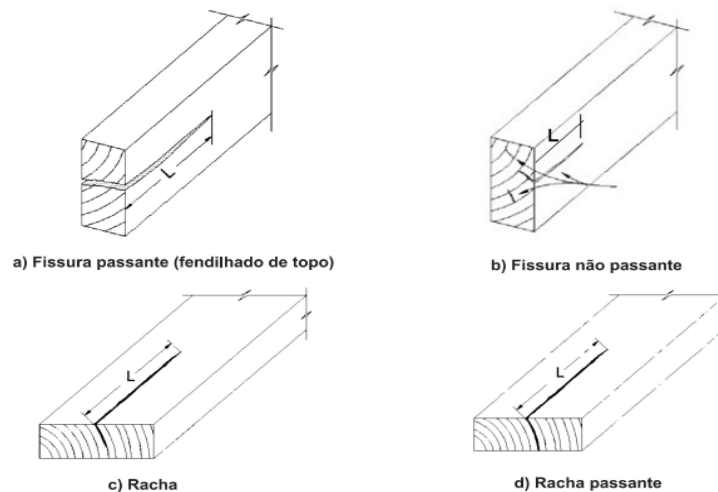


Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

4.6.3 Fissuras

As fissuras compreendem aquelas passantes e não passantes, os fendilhamentos e as rachas. Seus comprimentos (L) são mensurados paralelamente ao comprimento da peça (Figura 19), e suas larguras são mensuradas ao longo da seção transversal da peça.

Figura 19 – Classificação visual medição da fissura.

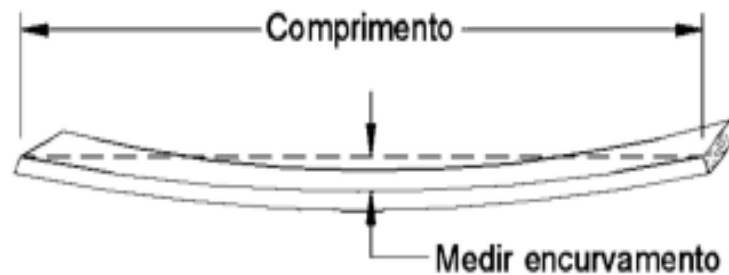


Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

4.6.4 Encurvamento

É um encurvamento da peça em relação ao seu eixo de menor inércia (Figura 20). Deve ser medido no ponto de maior deslocamento em relação a linha reta que une as duas extremidades da peça.

Figura 20 – Classificação visual medição do encurvamento.

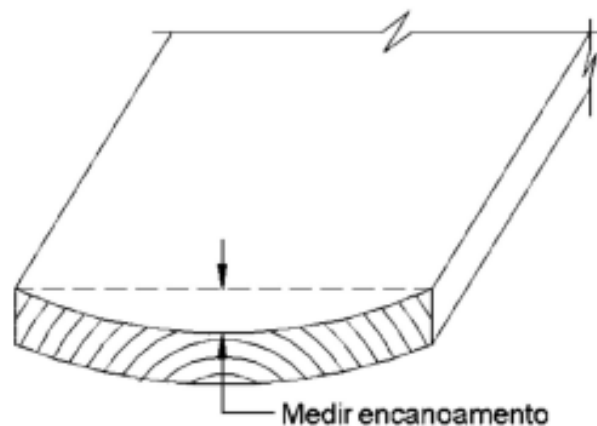


Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

4.6.5 Encanoamento

É um empenamento da peça de madeira, configurando uma face concava e outra convexa (Figura 21). Deve ser medido no ponto de maior deslocamento em relação a linha reta que une duas bordas da peça.

Figura 21 – Classificação visual medição do encanoamento.



Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

4.6.6 Torcimento

É uma combinação de empenamento em relação aos eixos de maior e de menor inércia fazendo com que a peça de madeira fique com forma espiralada (Figura 22).

Figura 22 – Classificação visual medição do torcimento.

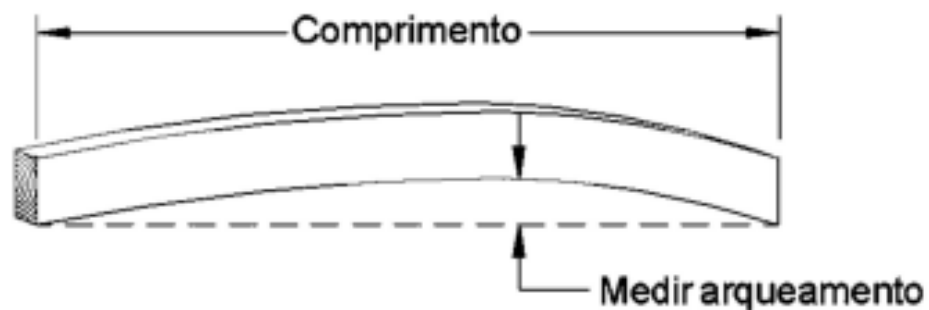


Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

4.6.7 Arqueamento

É um empenamento em relação ao eixo de maior inércia de uma peça de madeira (Figura 23). Deve ser medido no ponto de maior deslocamento em relação a linha reta que une as duas extremidades da peça.

Figura 23 – Classificação visual medição do arqueamento.

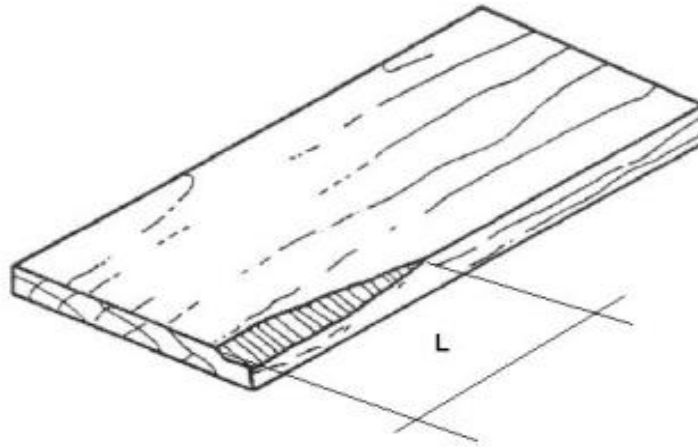


Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

4.6.8 Esmoadado

É a ausência de madeira, causada por qualquer motivo, na quina de uma peça de madeira serrada. Seu comprimento (L) é mensurado paralelamente ao comprimento da peça (Figura 24). Suas dimensões transversais são mensuradas ao longo da espessura e largura da seção transversal.

Figura 24 – Classificação visual medição do comprimento do esmoado.



Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

4.7 Classificação mecânica das lamelas

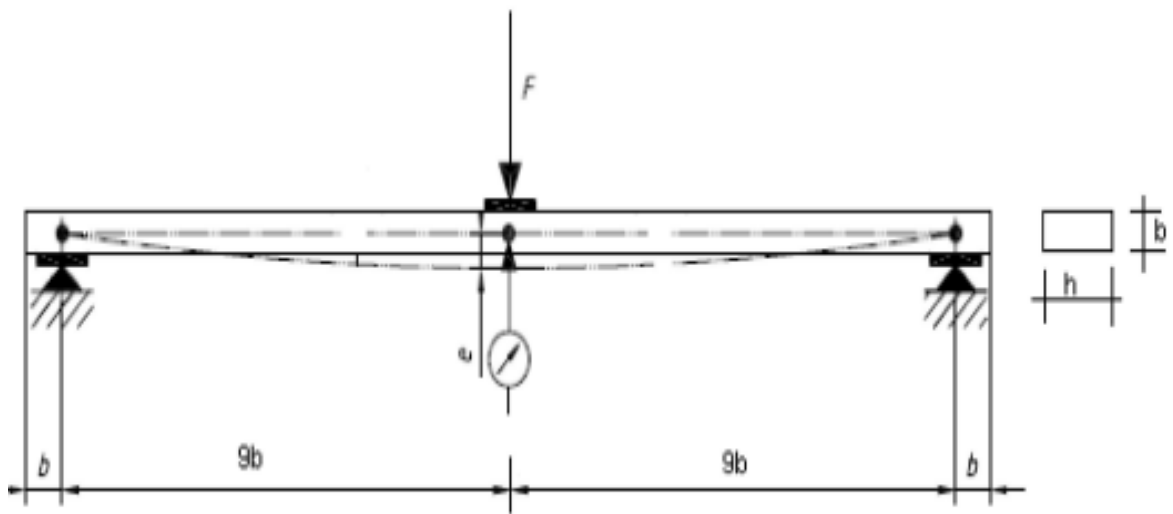
Para fins de classificação mecânica, o ensaio referencial para avaliação do módulo de elasticidade (E_0) de cada peça que compõe o lote de madeira a ser empregada é o de flexão estática a 3 pontos – força concentrada no meio do vão livre – com mensuração da flecha no meio do vão. A classificação mecânica também separa as peças em classes de módulos de elasticidade. A peça é escolhida em comparação com a classificação visual, escolhendo-se a menor classe obtida para a peça em ambos os dois tipos de classificação.

Na classificação mecânica, a peça deve ser ensaiada com seu comprimento e seção transversal integrais, na posição de menor inércia (deitada), mantendo-se um vão livre de 18 vezes a espessura nominal da seção transversal (b). Geralmente essa classificação é recomendada para lamelas que serão usadas em vigas de MLC e painéis de CLT submetidos a flexão. No entanto é sempre importante avaliar a situação real de trabalho do elemento de madeira para definir a orientação da altura da peça no ensaio de flexão.

Sempre que justificável, por representar uma condição mais desfavorável de desempenho estrutural, o posicionamento da peça no dispositivo de ensaio pode resultar em balanços laterais assimétricos.

A borda tracionada da peça deve ser escolhida aleatoriamente (Figura 25). O carregamento deve ser monotônico crescente, de forma a propiciar acréscimo de tensão nas bordas da peça de 10 MPa.min^{-1} . O deslocamento deve ser avaliado no centro do vão livre, com medidores de deslocamento com exatidão de $0,01 \text{ mm}$.

Figura 25 – Classificação mecânica com ensaio de flexão.



Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

A classificação mecânica das lamelas pode também ser feita por outros ensaios que utilizam técnicas não destrutivas, entre os quais podem ser citados: vibração transversal, excitação por impulso e ondas de tensão.

O método de excitação por impulso consiste em aplicar um impacto breve e controlado sobre a amostra de madeira para induzir vibrações naturais, que são captadas por sensores como acelerômetros. A análise das frequências naturais resultantes permite determinar o Módulo de Elasticidade (MOE) do material, com base na relação entre as propriedades dinâmicas e a rigidez longitudinal da madeira. Esse procedimento é não destrutivo, rápido e eficaz, sendo amplamente utilizado para avaliar a qualidade e uniformidade da madeira sem comprometer sua integridade física (Ross, 2010; Gardner et al., 2006).

4.8 Ensaios e modelo dos corpos de prova para peças de dimensões estruturais de um lote homogêneo

Não existe uma norma brasileira específica para os ensaios de painéis NLT. Portanto, no itens seguintes são apresentadas algumas normas que trazem recomendações para ensaios em peças estruturais e corpos de prova, os quais foram usados para os painéis NLT na presente pesquisa.

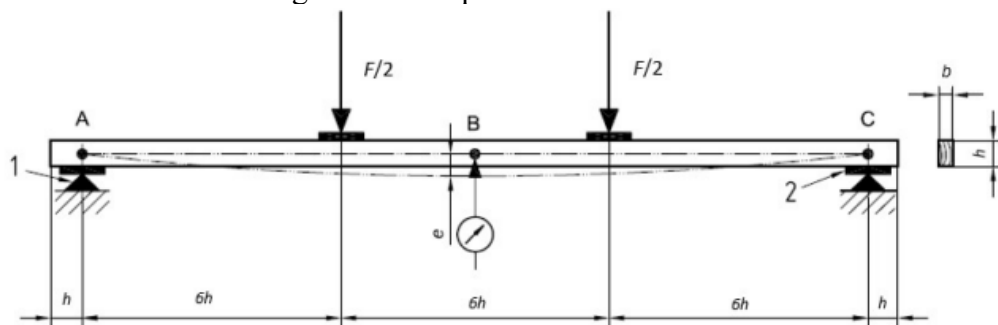
4.9 Norma brasileira ABNT NBR 7190-4: 2022

Para painéis e vigas com dimensões estruturais um dos principais ensaios recomendados é o de flexão estática, que obtém a resistência e a rigidez do elemento e para isso a norma ABNT NBR 7190-4: 2022 recomenda que a configuração do ensaio deve ser conforme a Figura 26. A viga de vão igual a $18h$ deverá receber um carregamento em dois pontos, espaçados igualmente entre os apoios nas extremidades, com cada força igual a $F/2$. A face tracionada da viga deve ser definida aleatoriamente.

Para evitar a instabilidade lateral durante o carregamento, devem ser criados vínculos que restrinjam deslocamentos laterais para conter esse efeito. Estes vínculos não podem proporcionar qualquer resistência ao deslocamento na direção do carregamento.

Esse não é um ensaio específico para painéis MLP, mas sim para elementos de madeira de reflorestamento com dimensões estruturais, pois não existem recomendações normativas brasileiras específicas para o ensaio de elementos do tipo MPL. Neste caso o painel é ensaio na direção de maior inércia da peça.

Figura 26 – Esquema do ensaio de flexão.



Fonte: ABNT NBR 7190-4: 2022.

O módulo de elasticidade na flexão (E_0) deve ser determinado por meio da medição do deslocamento (e), no ponto central. Quando isto não for possível poderá ser medido o deslocamento vertical no ponto central da superfície inferior da viga e a força aplicada deve ser aumentada até que haja a falha.

Para avaliar o módulo de elasticidade na flexão (E_0) o deslocamento incremental que corresponde a força incremental deve ser selecionado no trecho da fase elástico-linear do gráfico força x deslocamento. O módulo de elasticidade na flexão (E_0) é calculado pela seguinte equação:

$$E_0 = \frac{23}{108} \times \left(\frac{L}{h}\right)^3 \times \left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right) \times \frac{1}{b} \quad (8)$$

Onde:

b é a espessura do elemento (mm);

L é o comprimento do vão (mm);

ΔF são respectivamente os níveis de carga aplicada com máximo de 10% e 40% da carga última máxima de ruptura em (N);

Δe são os deslocamentos (mm) referentes às cargas F2 e F1, respectivamente.

O intervalo de 10% a 40% da força máxima deve ser utilizado para determinar $\Delta F/\Delta e$. O módulo de elasticidade na flexão pode ser avaliado por meio da medição do movimento de pontos diferentes dos descritos anteriormente, desde que uma equivalência aceitável para estes procedimentos seja estabelecida, a resistência convencional a flexão (f_m) deve ser calculada a partir de:

$$f_m = \frac{F_{rupt} \times L}{b \times h^2} \quad (9)$$

Onde:

F_{rupt} é o valor da força de ruptura aplicada a força última (N);

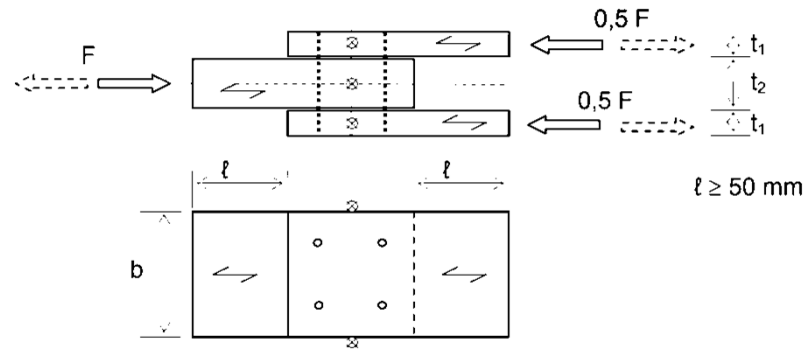
L é o vão livre entre apoios, igual a 18 h (mm);

b é a largura da seção transversal do corpo de prova (mm);

h é a altura da seção transversal do corpo de prova (mm).

Para obter a resistência da ligação entre os elementos de madeira que forma o painel, o ensaio deve seguir as recomendações da norma ABNT NBR 7190-5:2022, conforme modelo de corpo de prova especificado na Figura 27. Trata-se de um ensaio específico para ligações entre peças de madeira não exatamente para MLP.

Figura 27 – Dimensões do corpo de prova para analisar a resistência da ligação.



Fonte: ABNT NBR 7190-5: 2022.

Para a resistência das ligações com pino metálico a norma a ser atendida é a ABNT NBR 17023: 2022, sendo o cálculo é feito a partir da equação 10.

$$R_k = F_{V,Rk} \times n_{sp} \times n_{ef} \quad (10)$$

Onde:

R_k é a resistência característica da ligação (MPa);

$F_{V,Rk}$ é a resistência característica de um pino correspondente a dada seção de corte ligação (MPa);

n_{sp} é a quantidade de seções de corte por pino metálico;

n_{ef} é o número efetivo de pinos por ligação em linha $[8 + \frac{2}{3}(\text{número de pinos} - 8)]$.

O método de ensaio para determinar a força $F_{V,Rk}$ conforme o documento ABNT NBR 7190-5: 2022, especifica que os corpos de prova de madeira devem estar confeccionados conforme a Figura 27, sendo que o ensaio deve ser realizado na máquina de ensaio universal equipada com célula de carga adequada à faixa de forças esperadas, com dispositivos de apoio e de aplicação de carga que permitam a distribuição uniforme da carga e evitem concentrações de tensão. O corpo de prova deve ser colocado na máquina de ensaio de modo que a força seja aplicada de forma no topo da peça de madeira e a carga deverá ser aplicada de maneira contínua e uniforme até a falha do corpo de prova, registrando a força máxima alcançada. A força característica de resistência ao cisalhamento $F_{V,Rk}$ é determinada pela média dos valores máximos de força alcançados divididos pela área de cisalhamento da seção transversal.

4.10 Normas estrangeiras

Da mesma forma que no país, no exterior também não há especificações de montagem ou testes mecânicos específicos para a Madeira Lamelada Pregada. Apesar de ser um produto já comum e consolidado na construção civil internacional, ainda não existe uma norma que forneça orientações específicas para a instalação e testes desse produto.

A Madeira Lamelada Pregada (MLP) é uma técnica de construção menos comum em comparação com a Madeira Lamelada Colada (MLC) e, portanto, há menos normas dedicadas especificamente a ela. No entanto, há normas internacionais que incluem diretrizes e requisitos que podem ser aplicados à MLP. A seguir estão algumas normas estrangeiras que podem ser relevantes para Madeira Lamelada Pregada.

Norma Norte-Americana (ANSI/AWC NDS-2018) – *National Design Specification (NDS) for Wood Construction* especificação da *American Wood Council (AWC)*: fornece diretrizes para o cálculo de estruturas de madeira, incluindo a resistência das ligações feitas com pregos, parafusos e outros fixadores, embora seja mais geral, suas diretrizes podem ser aplicadas à Madeira Lamelada Pregada.

Principais Diretrizes da ANSI/AWC NDS-2018 para Ligações com Fixadores:

- **Prego (*Nails*)** - O tipo de prego inclui pregos comuns, pregos de anel e pregos espiralados. A resistência à retração depende do diâmetro do prego, da penetração na peça de madeira, e do tipo de madeira. A capacidade de cisalhamento avaliada com base no diâmetro do prego e na espessura das peças de madeira unidas. A penetração mínima recomendada é que o prego penetre pelo menos 10 a 12 vezes o diâmetro do prego na peça de madeira de maior espessura.
- **Parafusos (*Wood Screws*)** – São recomendados parafusos de madeira convencionais, incluindo parafusos de cabeça chata e parafusos de cabeça redonda. A resistência à tração e ao cisalhamento depende do diâmetro do parafuso, do comprimento da rosca engatada, e do tipo de madeira. O diâmetro de furo piloto deve ser adequado para o diâmetro do parafuso para evitar a divisão da madeira. A profundidade de penetração da rosca deve ser pelo menos 7 vezes o diâmetro do parafuso na peça de madeira mais espessa.
- **Parafusos Estruturais (*Lag Screws*)** – Diferentes diâmetros e comprimentos são utilizados para diferentes aplicações estruturais. Furos piloto devem ser feitos com um diâmetro ligeiramente menor que o diâmetro do parafuso. A

capacidade de carga é baseada no comprimento da rosca engatada e na densidade da madeira.

- Parafusos Auto-perfurantes (*Self-tapping Screws*) - inclui parafusos projetados para perfurar e roscar em um único passo. A capacidade de resistência é avaliada com base no diâmetro do parafuso e no tipo de madeira. O comprimento da rosca deve ser suficiente para proporcionar uma fixação segura sem necessidade de furo piloto.

Além dos critérios específicos para cada tipo de fixador, o documento NDS-2018 inclui fatores de modificação para ajustar a capacidade de carga das ligações em diferentes condições:

- Fator de Umidade - Ajusta a capacidade de carga com base no teor de umidade da madeira;
- Fator de Duração de Carga - Ajusta a capacidade de carga com base na duração da carga aplicada;
- Fator de Temperatura - Considera os efeitos de temperaturas elevadas ou baixas na resistência das ligações;
- Fator de Grupo de Madeira - Ajusta a capacidade com base na densidade e no tipo de madeira utilizada.

A NDS-2018 é um recurso essencial para engenheiros e projetistas de estruturas de madeira, proporcionando orientações detalhadas para o cálculo seguro e eficaz de ligações feitas com pregos, parafusos e outros fixadores.

ANSI/AWC SDPWS-2021, *Special Design Provisions for Wind and Seismic* (SDPWS) - complementa o documento NDS e fornece diretrizes específicas para o cálculo de estruturas de madeira em regiões sujeitas a cargas de vento e sismos. As seções sobre fixadores mecânicos são relevantes para MLP. Além disso, a norma Norte Americana ASTM D4761-13 trata dos métodos de ensaio mecânico e físico para produtos de madeira estrutural, métodos que também podem ser aplicados à Madeira Lamelada Pregada.

A ASTM D4761-13 estabelece que o módulo de elasticidade de longo vão (E) deve ser definido como o módulo de elasticidade calculado a partir da deflexão medida em um teste plano de madeira serrada com carga no ponto central, considerando uma relação largura-profundidade (L/h) de aproximadamente 100 (90 a 110). Uma carga concentrada conhecida é aplicada no meio do vão de uma peça de madeira simplesmente apoiada na direção horizontal. Utiliza-se um dispositivo de medição de deslocamento para determinar a deflexão da peça de madeira sob a carga. O módulo de elasticidade (E) é determinado relacionando a

deflexão com o tamanho da madeira serrada e a extensão do teste. Pode ser utilizado qualquer suporte que ofereça suporte irrestrito em ambas as extremidades. Se o suporte for posicionado em apenas uma extremidade, é necessário garantir estabilidade para uma peça de madeira torcida, por meio de um pedestal com suporte de ponto único, um suporte projetado para inclinar-se para corresponder à rotação da madeira, ou calços especiais que restrinjam a rotação da madeira. Cada ponto de apoio deve incluir um ponto de articulação no plano. Quando placas de apoio são utilizadas, elas devem ser inicialmente centralizadas em torno de seus pontos de articulação. Para medição de deslocamento, é necessário um dispositivo com capacidade para medir deflexões de pelo menos 1 pol. (25 mm) até 0,001 pol. (0,025 mm) de percurso. Um peso de aproximadamente 5 lbf (22,24 N) é utilizado para pré-carregamento, enquanto pesos compactos calibrados com precisão (para 0,05 lbf) (0,22 N) são empregados para carregamento. O módulo de elasticidade de longo vão é determinado usando a equação 12.

$$E = \frac{5 \times P \times L^3}{48 \times \Delta I} \quad (12)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade (MPa);

P é o incremento da carga aplicada (N);

L é o comprimento do vão (mm);

Δ é o incremento de deflexão correspondente ao incremento da carga aplicada (mm);

I é o momento de inércia (mm).

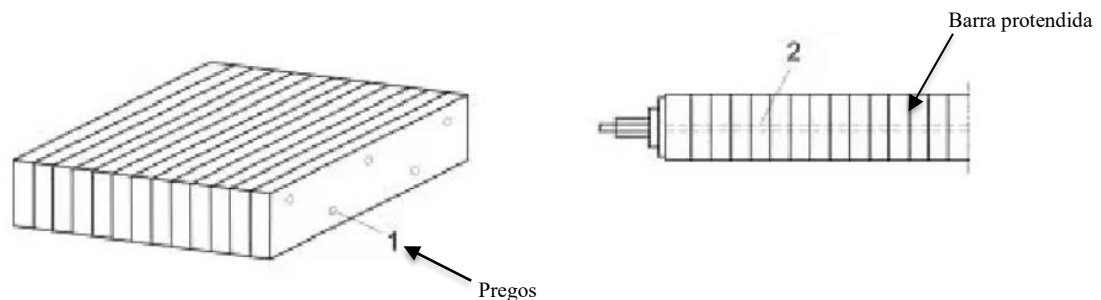
A Norma Europeia Eurocode 5 (2004) – Parte 1-1, aborda o cálculo de estruturas de madeira e incluem diretrizes para ligações pregadas. Fornece métodos de cálculo que podem ser aplicados à Madeira Lamelada Pregada. O Eurocode 5 (2004) – Parte 1-2 complementa a parte 1-1, fornecendo diretrizes para o cálculo de estruturas de madeira em condições de incêndio, incluindo ligações pregadas.

O Eurocode 5 (2004) – Parte 1-1 fornece equações detalhadas para calcular a resistência das ligações, considerando os diferentes modos de falha. O Método de Cálculo da Ligação utiliza a resistência característica dos materiais e os fatores de modificação para garantir a segurança e a eficiência das ligações. O Eurocode 5 (2004) é uma norma abrangente

que fornece diretrizes detalhadas para o design de ligações em estruturas de madeira, garantindo segurança, durabilidade e eficiência no uso de fixadores mecânicos.

A Eurocode 5 (2004) menciona ainda os tabuleiros lamelados protendidos de madeira que são placas de tabuleiro lamelados feitas de laminações dispostas lateralmente com superfícies serradas ou aplainadas, mantidas sobre um esforço de protensão (Figura 28), produto similar a Madeira Lamelada Pregada, mas, no entanto, eles se diferenciam apenas pela barra protendida.

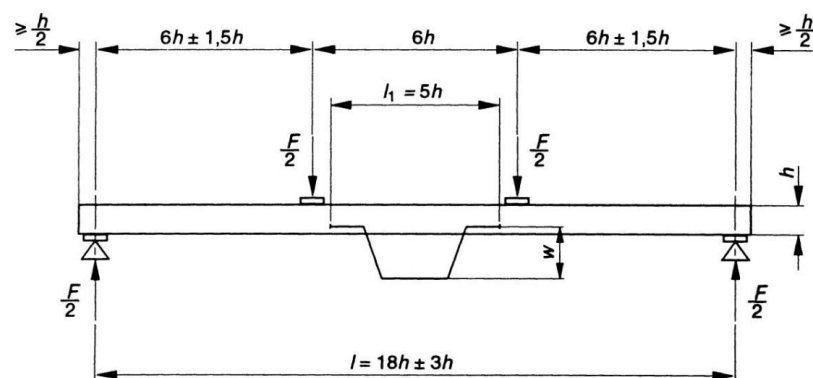
Figura 28 – Exemplo de tabuleiro lamelado protendido.



Fonte: Eurocode 5 (2004).

A norma europeia EN 408:1995 recomenda um método de ensaio para determinação do módulo de elasticidade na flexão, em que o corpo de prova deve ter o comprimento total de 19 vezes a espessura da seção. O carregamento aplicado sobre o corpo de prova deve ser simetricamente em ensaio de flexão em quatro pontos ao longo de um vão de 18 vezes a altura como apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Arranjo de teste para medição do módulo de elasticidade na flexão.



Fonte: Eurocode em 408 (1995).

O módulo de elasticidade na flexão é obtido pela seguinte equação 13:

$$E_m = \frac{a \times l_1^2 \times (F_2 - F_1)}{16l \times (w_2 - w_1)} \quad (13)$$

Onde:

E_m é o valor do módulo de elasticidade obtido na flexão;

l é o vão livre entre apoios;

$F_2 - F_1$ são as forças referentes a 40% e 10% da carga de ruptura;

$w_2 - w_1$ são os deslocamentos referentes a 40% e 10% das cargas aplicadas).

Norma Australiana AS 1720.1:2010 (R2018) - *Timber structures - Design methods*: inclui métodos de cálculo para estruturas de madeira e aborda a resistência e o comportamento das ligações pregadas, fornecendo diretrizes aplicáveis à madeira lamelada pregada.

Norma australiana AS 1649:2001 - *Timber - Methods of test for mechanical fasteners and connectors - Basic working loads and characteristic strengths*: especifica métodos de teste para determinar as cargas de trabalho e forças características de fixadores mecânicos, como pregos, o que é relevante para a avaliação da resistência das ligações em MLP.

A norma australiana AS 1649:2001 especifica métodos de teste para determinar as cargas de trabalho e as forças características de fixadores mecânicos usados em madeira, como pregos, parafusos e conectores. É relevante para a avaliação da resistência das ligações em madeira lamelada pregada (MLP). Dos principais métodos de teste, temos o teste de cisalhamento que determinar a resistência ao cisalhamento dos fixadores, em que o procedimento consiste em aplicar uma carga lateral ao fixador até a falha, medindo a resistência máxima. Além disso há também o teste de arrancamento que avalia a resistência ao arrancamento dos fixadores da madeira em que uma carga de tração ao fixador é aplicada até que ele seja arrancado da madeira, e por fim, o teste compressão e tração, em que o de compressão mede a resistência da madeira e das ligações sob cargas de compressão e o de tração mede a resistência das ligações sob cargas de tração. Na prática o Cálculo de Estruturas de Madeira Lamelada Pregada auxilia a escolha adequada dos tipos de pregos e parafusos com base nas cargas esperadas e nas condições de uso e a disposição e espaçamento dos fixadores para otimizar a resistência e rigidez da estrutura.

Norma Japonesa JAS 3079 *Standard for Structural Laminated Veneer Lumber (LVL)*: embora focada em madeira micro laminada, esta norma contém diretrizes aplicáveis ao cálculo de elementos estruturais laminados, incluindo ligações pregadas como testes de

cisalhamento e arrancamento. Os métodos de teste para determinar a resistência dos fixadores pregados em LVL podem ser aplicados a MLP, com ligações pregadas sob condições variadas de umidade e temperatura. Traz recomendações para a configuração e penetração de pregos além de espaçamentos dos pregos para otimizar a resistência e rigidez da ligação. Utiliza fatores de segurança adequados para garantir a confiabilidade das ligações pregadas.

A norma Japonesa também utiliza a resistência característica para determinação das resistências características dos fixadores pregados com base em testes e cálculos estatísticos e os ajustes para duração de carga, umidade, temperatura e outros fatores ambientais que podem afetar a capacidade de carga das ligações pregadas. Existem também os testes de carga para verificar a resistência das ligações pregadas em condições simuladas de uso real.

Norma Canadense CSA O86:19 - *Engineering design in wood*: aborda o cálculo de estruturas de madeira e inclui diretrizes para ligações mecânicas, que podem ser aplicadas à Madeira Lamelada Pregada.

Essa norma fornece uma base geral para o projeto e a construção de estruturas utilizando madeira, abordando aspectos como resistência dos materiais, métodos de cálculo e requisitos de segurança. Para um uso específico de MLP, é importante considerar as diretrizes de fixação e os métodos de construção detalhados nessas normas.

4.11 Análise numérica

A simulação numérica é uma técnica computacional usada para modelar e analisar o comportamento de sistemas complexos através de algoritmos e cálculos matemáticos. Esta abordagem permite prever a resposta de um sistema sob diferentes condições e cenários sem a necessidade de experimentos físicos. A modelagem numérica representa o sistema real através de equações matemáticas que descrevem suas propriedades e comportamento. Já os algoritmos computacionais utilizam algoritmos específicos para resolver as equações matemáticas, muitas vezes através de métodos numéricos como o método dos elementos finitos (FEM). No entanto são necessários dados de entrada precisos, como propriedades materiais, condições de contorno e cargas aplicadas. A simulação gera resultados detalhados que podem incluir deslocamentos, tensões, deformações, fluxos de calor, etc. A visualização dos resultados através de gráficos, animações e modelos 3D, permite uma análise mais intuitiva e detalhada dos aspectos de interesse.

Uma das grandes vantagens da simulação numérica é o custo já que ela reduz a necessidade de protótipos físicos e testes destrutivos. Além disso, permite testar uma ampla gama de cenários e condições, avalia também sistemas críticos em condições extremas sem

riscos físicos e facilita a exploração de novos conceitos e cálculos de forma rápida e eficiente. A simulação numérica é uma ferramenta poderosa que auxilia engenheiros, cientistas e pesquisadores a compreender e prever o comportamento de sistemas complexos, contribuindo significativamente para avanços tecnológicos e científicos.

Segundo Molina (2008), atualmente, com o avanço dos microcomputadores, estudos de caráter numérico têm ocorrido com maior frequência. Dentre as ferramentas existentes para análise numérica destacam-se programas comerciais ou softwares específicos (SAP2000, ANSYS, ABAQUS, ADYNA, RFEM, etc.) desenvolvidos com base no Método dos Elementos Finitos. Esses *softwares* possibilitam reproduzir numericamente o comportamento das estruturas evitando-se custos inerentes à realização de ensaios experimentais sem a necessidade do desenvolvimento analítico, em geral descritos por equacionamentos custosos, em razão da considerável complexidade da análise nos campos das tensões e das deformações.

No contexto nacional, as estruturas de madeira têm sido amplamente estudadas no que se refere aos aspectos teóricos e experimentais e, mais recentemente, no referente aos aspectos numéricos. Além disso, a simulação numérica permite a análise detalhada dos aspectos de interesse como, por exemplo, a concentração de tensões nas regiões de maior solicitação dos modelos, o que não é possível de se observar claramente nos ensaios experimentais. A grande maioria dos trabalhos observados na literatura não consideram o verdadeiro comportamento dos materiais. Os modelos observados propõem formas simplificadas de análise sem considerar os modos de falha obtendo, desta forma, respostas muito conservadoras. A maioria das simulações numéricas observadas na literatura são efetuadas a partir da consideração de uma análise linear elástica. Neste caso, os resultados são válidos na medida em que as deformações plásticas dos materiais são pequenas. Na maioria dos modelos observados na literatura, as conexões foram modeladas por elementos de barra, unidos por nós comuns, pertencentes aos três materiais, sem considerar, no entanto, para o conector de aço, sua verdadeira configuração discretizada. Essa estratégia de modelagem não permite a verificação de aspectos localizados importantes como, por exemplo, a concentração de tensões para os conectores de aço.

Vilela, Mascia e Donadon (2021) realizaram um estudo para avaliar a confiabilidade estrutural do dimensionamento de vigas de MLC da espécie *Pinus taeda* reforçadas com fibras de Vectran, utilizando o método dos elementos finitos. As simulações numéricas foram conduzidas no software ANSYS, empregando os parâmetros de resistência e rigidez definidos pela norma brasileira de estruturas de madeira, além da teoria dos volumes para estimar os parâmetros físico-mecânicos do reforço com fibras. A probabilidade de falha do

dimensionamento foi analisada através da simulação de Monte Carlo, utilizando um programa implementado em linguagem Matlab. A simulação considerou a variação das propriedades mecânicas da madeira, adesivo e fibra, bem como as correlações de Pearson entre elas. Elementos do tipo SOLID186 foram usados para discretizar a viga de madeira e elementos do tipo SHELL181 para o reforço de fibra. A interface de contato foi modelada utilizando os elementos CONTA174, TARGE170 e SURF154, selecionados pela otimização do programa. O critério para a escolha do tamanho da malha e a validação de sua convergência foi baseado no *Grid Convergence Index* (GCI), um método amplamente utilizado na literatura científica para quantificar as incertezas da discretização.

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos com foco na avaliação numérica de elementos de madeira, contribuindo significativamente para o entendimento do comportamento estrutural desses materiais. Nesse contexto, Bilesky, De Conti e Roel de Deus (2019) realizaram uma modelagem numérica da madeira *Corymbia citriodora* a partir de ensaios de cisalhamento, utilizando o software ANSYS. Inicialmente, foi realizada uma análise de convergência para definição da malha, a qual estabilizou os deslocamentos com o aumento da densidade, resultando em um modelo composto por 10.600 elementos e 32.275 nós.

Com o modelo estabelecido, foi possível observar que os campos de tensão e deslocamento na região de colagem do extensômetro apresentaram comportamento homogêneo, o que confirma a viabilidade do método aplicado à madeira *Corymbia citriodora*. A homogeneidade dos campos de deslocamento ϵ_x e ϵ_y também foi observada para a madeira *Pinus* e para materiais anisotrópicos, demonstrando uma tendência de deslocamentos graduais — condição desejável para a obtenção de um estado de cisalhamento puro. Por fim, o estudo evidenciou que, ao contrário dos ensaios normatizados que frequentemente subestimam as propriedades mecânicas por não alcançarem esse estado ideal, a abordagem numérica adotada demonstrou bom desempenho para a madeira analisada (Bilesky et al., 2019).

4.11.1 Software RFEM

Para simulação numérica do comportamento do elemento de MLP na flexão um dos *softwares* que pode ser usado é o RFEM (RSTAB/RFEM) que é um *software* de análise estrutural desenvolvido pela empresa alemã *Dlubal Software*. Ele é amplamente utilizado para análise e dimensionamento de estruturas complexas em engenharia civil e estrutural. A análise numérica no RFEM envolve uma variedade de processos e técnicas que são aplicadas

para determinar o comportamento e a resposta estrutural de sistemas complexos. A análise numérica no RFEM começa com a criação de um modelo estrutural detalhado. Isso envolve a definição de elementos estruturais como vigas, colunas, lajes, paredes, entre outros, bem como a aplicação de cargas, restrições e combinações de cargas.

O RFEM oferece uma variedade de métodos de análise, incluindo análise estática linear e não linear, análise de estabilidade, análise dinâmica, análise de tensão, análise de fluência, entre outros. Cada método de análise é aplicado de acordo com as características específicas da estrutura e dos carregamentos. O *software* utiliza algoritmos numéricos avançados para resolver equações diferenciais e equações de equilíbrio estrutural. Isso inclui métodos de solução de sistemas lineares e não lineares, métodos de otimização, métodos iterativos, entre outros. Após a análise numérica, o RFEM fornece uma ampla gama de ferramentas de visualização para apresentar os resultados da análise. Isso inclui diagramas de esforços, deformações, tensões, deslocamentos, entre outros, que ajudam os engenheiros a interpretar o comportamento estrutural da obra.

Embora o software RFEM seja uma ferramenta robusta e amplamente utilizada na engenharia estrutural, sua aplicação na simulação numérica de elementos em madeira apresenta algumas limitações. Uma das principais restrições está relacionada à modelagem precisa do comportamento anisotrópico da madeira, especialmente em situações que envolvem carregamentos complexos ou variações de umidade, onde o RFEM opera com modelos simplificados e isotrópicos por padrão, a menos que extensivamente parametrizado. Além disso, o software possui restrições na representação detalhada de ligações mecânicas típicas de sistemas em madeira, como conexões com pregos, parafusos ou cavilhas, exigindo aproximações ou o uso de elementos de rigidez equivalente. A modelagem de falhas localizadas, como fendilhamento por tração perpendicular às fibras ou esmagamento em contatos concentrados, também não é nativamente representada com precisão, sendo necessário complementar a análise com ferramentas específicas ou validação experimental. Por fim, para elementos como os painéis de Madeira Lamelada Pregada (MLP), que envolvem comportamento composto e contato entre lamelas, o RFEM não permite uma simulação direta do processo construtivo ou da interação entre as camadas, limitando-se a uma abordagem homogênea e contínua. Essas limitações reforçam a importância da calibração com dados experimentais e da interpretação crítica dos resultados numéricos obtidos por meio da ferramenta (Dlubal Software GmbH, 2023).

Em resumo, a análise numérica no *software* RFEM envolve a modelagem detalhada da estrutura, a aplicação de métodos de análise avançados e a interpretação dos resultados

para garantir o desempenho e a segurança da obra. É uma ferramenta poderosa para engenheiros que trabalham com projetos de engenharia civil e estrutural.

No contexto do RFEM, a discretização é feita com tipos de elementos finitos apropriados para a análise de estruturas, como vigas, pilares, superfícies e sólidos. Os elementos finitos em RFEM são mais genericamente categorizados como:

- Elementos de Barras (1D) - Utilizados para modelar vigas, colunas, treliças e outros componentes estruturais lineares. Estes elementos podem ser submetidos a esforços axiais, cortantes, momentos fletores e torções;
- Elementos de Superfície (2D) - Utilizados para modelar placas, chapas, cascas e membranas. São adequados para estruturas onde a distribuição de tensões e deformações é predominantemente bidimensional;
- Elementos de Sólidos (3D) - Utilizados para modelar volumes tridimensionais, como blocos de fundação, massas de concreto, etc. São adequados para análises onde a distribuição de tensões e deformações é tridimensional.

No RFEM, a malha de elementos finitos (FEM) é definida através de um processo que envolve a subdivisão do modelo estrutural em pequenos elementos finitos que podem ser analisados individualmente. Esses elementos são conectados por nós, formando uma rede ou malha que representa a estrutura em estudo. O processo de definição da malha no RFEM pode ser detalhado da seguinte forma:

- Criação do Modelo Estrutural - O primeiro passo é definir a geometria da estrutura. Isso inclui a criação de barras, superfícies ou sólidos que compõem o modelo. Depois é a atribuição das propriedades dos materiais aos diferentes elementos da estrutura;
- Configuração da Malha – É selecionado o tipo de elemento finito adequado para a análise (elementos de barra, superfície ou sólido) e também o tamanho dos elementos finitos. Pode ser especificado globalmente para todo o modelo ou localmente para áreas específicas. No tamanho global um tamanho de malha uniforme é aplicado a toda a estrutura, já no tamanho local ajustes locais podem ser feitos para áreas que requerem maior precisão, como zonas de alta concentração de tensões;

- Geração da Malha - O RFEM gera a malha automaticamente com base nas configurações fornecidas. Durante este processo, o *software* subdivide a geometria em elementos finitos, criando nós e elementos conforme necessário.
- Refinamento da Malha - Após a geração inicial, pode ser necessário refinar a malha em áreas críticas para melhorar a precisão dos resultados. O RFEM permite refinamentos manuais e automáticos;
- Verificação da Malha – A verificação da qualidade da malha gerada inclui a checagem da forma dos elementos, continuidade entre elementos e a densidade da malha;
- Correção de Erros – Os ajustes e correções são feitas caso sejam identificados problemas na malha, como elementos distorcidos ou mal conectados;
- Análise Preliminar - É realizado uma análise preliminar para verificar a convergência dos resultados, se os resultados não convergirem adequadamente pode ser necessário ajustar a malha. O processo pode envolver várias iterações de ajustes na malha e reanálise até que se obtenham resultados satisfatórios.

No RFEM, os elementos finitos de superfície e sólidos podem ser usados para modelar estruturas de madeira laminada pregada (MLP) e outros tipos de madeira laminada. Esses elementos são definidos por nós e integrações numéricas adequadas para resolver as equações de equilíbrio e compatibilidade nas estruturas.

4.12 Conclusões da revisão bibliográfica

Nas pesquisas avaliadas na literatura, constatou-se que foram fabricados e ensaiados painéis de Madeira Lamelada Pregada (MLP) utilizando espécies típicas dos países onde os artigos foram publicados, como Abeto e Eucalipto. Além disso, observou-se a aplicação de diferentes tipos de ligações entre as lamelas e a realização de variados ensaios sobre esse produto.

No entanto, no Brasil ainda não existem estudos publicados a respeito desse produto industrializado o que dificulta a aquisição de material literário sobre o assunto. Além da falta de artigos e pesquisas também não se tem norma que recomende processos de fabricação e ensaios para o MLP.

Com a escassez de informação nacional sobre o MLP foi possível iniciar o levantamento bibliográfico a partir de dados publicados no exterior. Contudo, os atributos do Brasil são adversos dos outros países, as espécies utilizadas nacionalmente são diferentes,

como os conectores e ensaios também. Isso impede até o momento o estabelecimento de conclusões gerais.

Sendo assim, é necessário iniciar pesquisas nacionais que utilizem espécies e conectores locais, afim de propor processos de fabricação e de ensaios que se encaixem na realidade do Brasil.

Observa-se que a Madeira Lamelada Pregada é uma ótima opção para quem busca uma solução estrutural sólida, durável e de fácil fabricação. A norma ABNT NBR 7190: 2022 projeto de estruturas de madeira foi recentemente revisada, a qual recomenda em diferentes documentos referentes a métodos de ensaios, análises e ensaios para classificação visual e mecânica de lamelas de MLC e MLCC que podem ser aplicadas também para o MLP; os métodos de ensaio também recomendam alguns ensaios para determinação das propriedades mecânicas no MLC e MLCC que também podem ser aplicadas ao MLP.

Já na análise das ligações desse painel é possível utilizar as recomendações de arranjos para ligações com pinos conforme ABNT NBR 7190-5: 2022. No entanto não existe uma recomendação específica para o painel MLP.

As simulações numéricas, de forma geral, não consideram o verdadeiro comportamento dos materiais. A madeira que geralmente é um material ortotrópico caracterizada por três principais direções em muitos trabalhos observados na literatura é modelada como um material isotrópico e esta estratégia embora simples, não representa exatamente o comportamento da madeira.

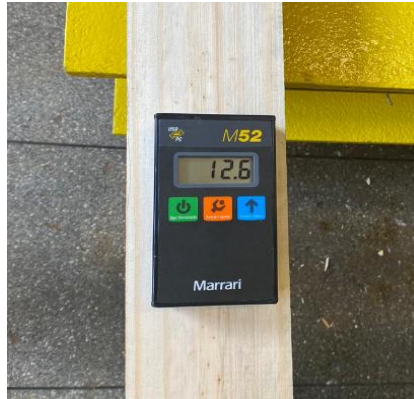
No entanto, a maioria das pesquisas desenvolvidas no âmbito numérico utilizam *softwares* como o ABAQUS e o ANSYS que não são específicos para estruturas de madeira. O software RFEM tem em sua biblioteca a norma de estruturas de madeira ABNT NBR 7190, e vem sendo utilizado no meio técnico da construção civil para o cálculo das estruturas de madeira. Não foram encontrados na literatura trabalhos envolvendo a MLP nem no âmbito experimental e nem numérico. Também não foram encontrados muitos trabalhos que utilizam o *software* RFEM por ser um software relativamente novo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Na fabricação dos painéis de MLC foi utilizada a espécie de madeira *Pinus ssp.*, que é uma espécie de reflorestamento com cerca de 8 a 10 anos e que foi doada pela empresa Solução Engenharia em Madeira. O material foi recebido já processado com as dimensões de 0,05 m x 0,10 m x 1,50 m, sendo um total de 18 peças. Também foram recebidas 18 peças

com as dimensões de 0,05 m x 0,10 m x 0,30 m. As peças foram submetidas a ensaios e o primeiro deles foi para a obtenção do Teor de Umidade (TU) sendo que para isso foi utilizado o medidor portátil da Marrari M52, e o TU médio obtido foi de $12\% \pm 1\%$ (Figura 30).

Figura 30 – Lamela com medidor de unidade M52.



Fonte: Autoria própria.

5.1 Classificação visual e mecânica

Para fabricação das vigas MLP foram feitas classificações visuais das lamelas de acordo com a norma ABNT NBR 7190-2: 2022. A Figura 31 apresenta os detalhes da classificação visual. Foram avaliados aspectos como: presença de nós, inclinação de fibras, empenamentos e rachaduras.

Figura 31 – Lamela avaliada na classificação visual.



Fonte: Autoria própria.

Além da classificação visual foi feita também uma classificação mecânica das lamelas, em que elas foram avaliados os módulos de elasticidade das peças utilizando o método de excitação por impulso. A técnica de excitação por impulso é um dos métodos de ensaio não destrutivo, que se baseia na detecção das ondas acústicas emitidas pelo material, assim que

o mesmo recebe uma excitação provocada por um propulsor. A partir daí determina-se o Módulo de elasticidade das lamelas (Figura 32) conforme equação 13.

Figura 32 – Ensaio pelo método de excitação por impulso para determinação do Módulo de elasticidade.



Fonte: Autoria própria.

O modulo de elasticidade foi calculado a partir da equação 13 abaixo que levou em conta a frequência obtida no ensaio.

$$Moe = \frac{\rho \times (2 \times L \times f)^2}{10^6} \quad (13)$$

Onde:

Moe é o módulo de elasticidade (GPa);

ρ é a densidade da madeira (kg/m^3);

f é a frequência longitudinal (Hz);

L é o comprimento do elemento (m);

Com os valores da classificação mecânica e a classificação visual das lamelas em mãos, as lamelas foram posteriormente agrupadas, combinando-se as lamelas para se obter os painéis de MLP para os ensaios. Para os ensaios de flexão dos painéis foram utilizados modelos de vigas formados por duas lamelas pregadas lado a lado com painel de compensado pregado na parte superior. A Tabela 1 mostra como ficou a composição das vigas de MLP a partir do uso de duas lamelas.

Tabela 1 – Composição dos corpos de prova para os ensaios de flexão.

	Corpo de prova	Lamela
Viga 0,10 x 0,10 x 1,5 m	CP1	L1 + L5
	CP2	L2 + L9
	CP3	L3 + L12
	CP4	L4 + L13
	CP5	L6 + L7
	CP6	L8 + L10
	CP7	L11 + L14
	CP8	L15 + L16

Fonte: Produção do próprio autor.

Foram também confeccionados corpos de prova de cisalhamento (*double shear*) para verificação dos comportamentos das ligações pregadas. No caso dos corpos de prova, para permitir o ensaio em um corpo de prova simétrico, foram consideradas três lamelas por corpo de prova.

A Tabela 2 mostra os detalhes dos corpos de prova para o ensaio de resistência da ligação que foram agrupados considerando-se três lamelas por corpo de prova.

Tabela 2– Composição dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento.

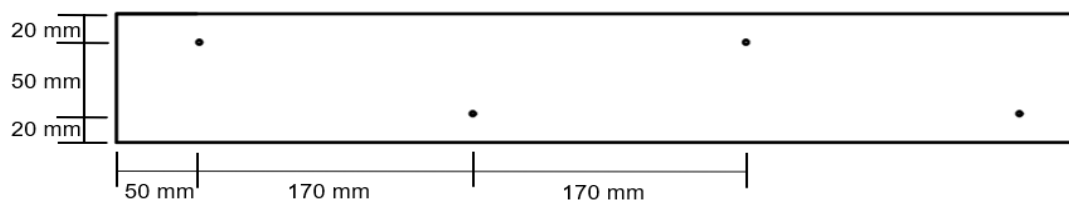
	Corpo de prova	Lamela
Corpos de prova do ensaio de resistência da ligação	CP1	L1 + L3 + L2
	CP2	L5 + L4 + L6
	CP3	L7 + L8 + L9
	CP4	L10 + L11 + L12
	CP5	L13 + L14 + L15
	CP6	L16 + L17 + L18

Fonte: Produção do próprio autor.

5.2 Confeção dos corpos de prova para os ensaios e cisalhamento e flexão

Para a confecção das vigas a partir de duas lamelas, as mesmas foram marcadas afim de pontuar os pontos em que receberam os pregos (Figura 33 e 34). Os pregos foram fixados em *zig-zag* pois a partir da revisão de literatura observou-se que esta se trata da melhor estratégia de fixação.

Figura 33 – Vista frontal da distância dos pregos nas lamelas.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Marcação dos pontos para receber os pregos.



Fonte: Autoria própria.

O processo de montagem das vigas consistiu no auxílio inicial de sargento metálico para o alinhamento das lamelas e assim a posterior fixação dos pregos por meio de pregadeiras pneumáticas (Figura 35). Foram utilizados pregos metálicos com dimensões 3,7 x 75 mm (diâmetro e comprimento).

Figura 35 – Fixação das vigas de MLP.



Fonte: Autoria própria.

Após fixação entre lamelas foi feita a fixação da chapa de compensado de resina fenólica com 8 mm de espessura e para essa fixação foram utilizados grampos metálicos com 8 mm de comprimento, 11,2 mm de largura e 0,6 mm de espessura, adotando-se uma distância entre grampos de aproximadamente 20 cm entre eles (Figura 36).

Figura 36 – Viga de MLP com chapa compensada fixada na parte superior.

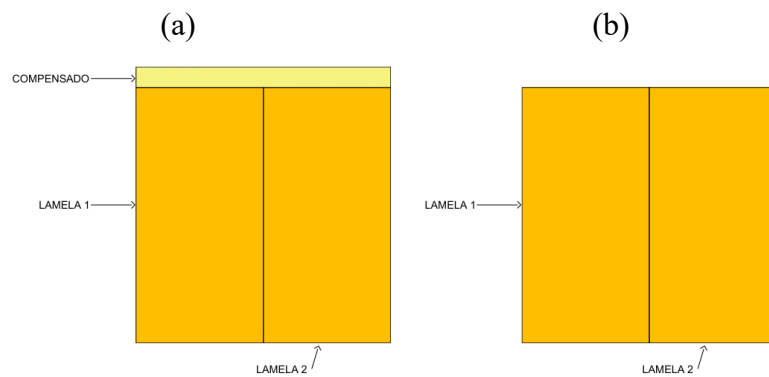


Fonte: Autoria própria.

No total foram fabricadas oito amostras de vigas de MLP com as dimensões de 0,10 x 0,10 x 1,5 m, em que seis deles receberam a chapa de compensado na camada superior e duas não (Figura 37). Isso foi feito para compreender melhor a importância e a forma como a fixação da chapa na camada superior influenciava no comportamento do MLP na flexão. O

número de amostras para ensaios de flexão utilizadas na pesquisa ficou a mercê da disponibilidade de material, uma vez que o material foi doado pela empresa Soluções em Madeira.

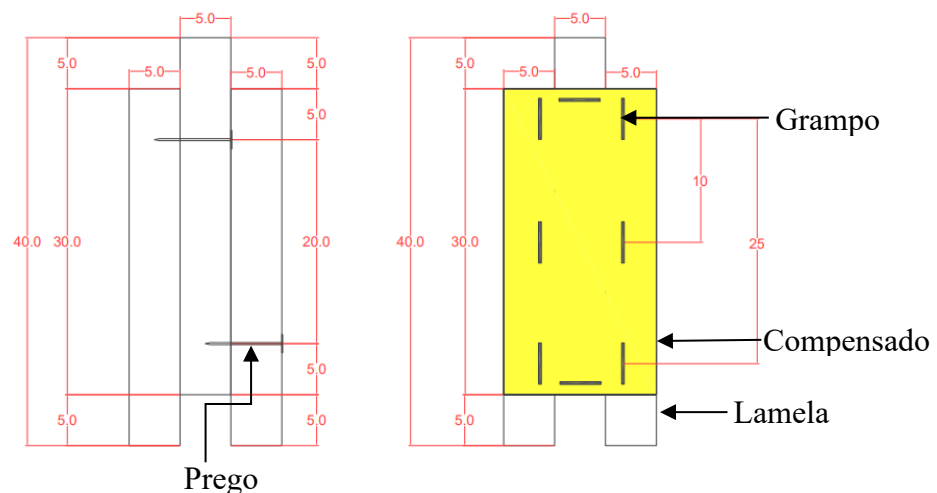
Figura 37 – Vista da seção transversal das amostras na flexão: (a) Seção com chapa compensada superior; (b) Seção sem chapa compensada superior.



Fonte: Autoria própria.

Já para os corpos de prova de cisalhamento, o processo foi o mesmo, mas a disposição das lamelas foi diferente. A Figura 38 mostra as dimensões do corpo de prova *double shear* e a Figura 39 mostra o corpo de prova fabricado. Ambos corpos de prova de flexão e cisalhamento foram retirados de vigas. Na Figura 38a observa-se que o corpo de prova apresenta pregos (um superior e outro inferior) usados para a fixação das três lamelas. O prego superior apresenta dois planos de corte e o inferior também apresenta dois planos de corte.

Figura 38 – Corpo de prova de cisalhamento para avaliação da resistência e rigidez interlamelar com uso de painel compensado (Unidades em cm).



Fonte: Autoria própria.

Nesse sentido, para o cálculo da resistência e da rigidez finais das ligações nos corpos de prova *double shear* os valores totais obtidos foram divididos por 3, uma vez que o sistema de ligação por pregos, neste caso, correspondeu a três planos de corte.

Figura 39 – Corpos de prova *double shear* confeccionado para os ensaios de cisalhamento com painel externo de compensado.

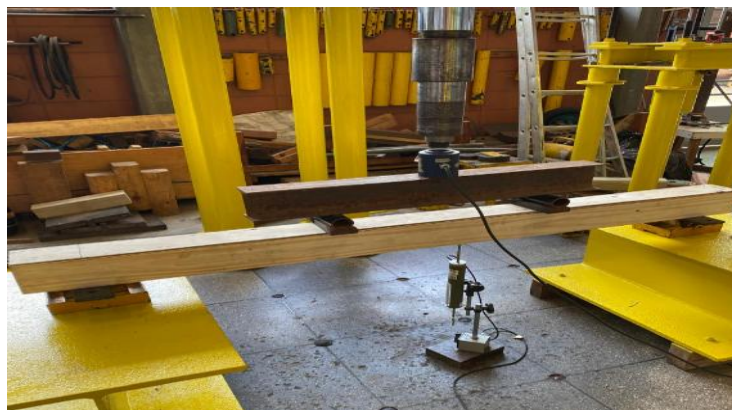


Fonte: Autoria própria.

5.3 Ensaio de flexão

Após a confecção dos elementos de MLP, foram realizados ensaios de flexão, considerando uma distância entre apoios de $13h$ (Figura 40). Os suportes para as extremidades do MLP foram constituídos por dois perfis metálicos. A relação L/h obtida foi de 15, e para valores de $L/h \leq 21$, a tendência foi que a viga rompesse por cisalhamento nas proximidades da linha neutra da seção transversal do elemento devido ao efeito da parcela de cisalhamento na flecha. Nesse contexto, os módulos de elasticidade tenderam a ser menores, pois existiu a parcela de deslocamento por cisalhamento na flecha final (modelo de viga de Timoshenko). O modelo de viga que desconsidera a parcela de deformação na flecha (para $L/h > 21$) é o modelo de Bernoulli conforme, Molina (2008).

Figura 40 – Ensaio de flexão em dois pontos da viga de MLP.



Fonte: Autoria própria.

O ensaio experimental de flexão de quatro pontos foi realizado no Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira (LaMEM) da EESC/USP. Para a aplicação da carga foi utilizado um pórtico de carga com capacidade de 480 kN acionado por um atuador de controle manual e sistema de aquisição de dados externo.

Foram registrados os valores de carga aplicados durante o carregamento, os deslocamentos verticais (flechas) no meio do vão e a carga última obtida para a ruptura do painel. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o Pressão- Modelo 1 com 4 canais onde dois deles foram utilizados para a recepção dos sinais, sendo um para a célula de carga e outro para o transdutor de deslocamento.

Os deslocamentos verticais no meio do vão do painel (flechas) foram medidos com uso de um transdutor de deslocamento do tipo LVDT com percurso máximo de 100 mm.

Uma célula de carga de 30 toneladas foi posicionada entre o cilindro do pórtico e a parte superior do painel para acompanhar a aplicação do carregamento.

As rigidezes EI dos painéis MLP foram obtidas pela equação (8) e a resistência última na flexão pela equação (9).

5.4 Ensaio de cisalhamento dos corpos de prova

Este ensaio experimental também foi realizado no Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira (LaMEM) da EESC/USP. A carga foi aplicada utilizando um pórtico de carga com capacidade de 250 kN acionado por um atuador de controle manual e sistema de aquisição de dados externo.

Assim como no ensaio de flexão os valores de carga aplicados durante o carregamento, o deslocamento e a carga última obtida para a ruptura do corpo de prova. Foram obtidos

através do sistema de aquisição de dados Pressão- Modelo 1 com 4 canais onde três deles foram utilizados para a recepção dos sinais, sendo um para a célula de carga e os outros dois para os transdutores de deslocamento posicionados em cada um dos lados dos corpos de prova.

Os deslocamentos verticais na lamela do meio foram medidos com uso de um transdutor de deslocamento do tipo LVDT com percurso máximo de 100 mm.

Uma célula de carga de 25 toneladas foi posicionada na parte superior do corpo de prova para acompanhar a aplicação do carregamento.

Para o ensaio dos corpos de prova foi obtido a Força Estimada (F_{est}) através da ruptura de um corpo de prova gêmeo. Com o valor de F_{est} foi aplicado no segundo corpo de prova uma carga de $0,5 F_{est}$ a qual foi mantida constante durante 30 seg. Essa força foi então reduzida até $0,1 F_{est}$ e mantida constante por mais 30 seg. Posteriormente a força foi aumentada até atingir a força última ou o deslizamento de 15 mm. A figura 41 mostra o corpo de prova, sendo ensaiado.

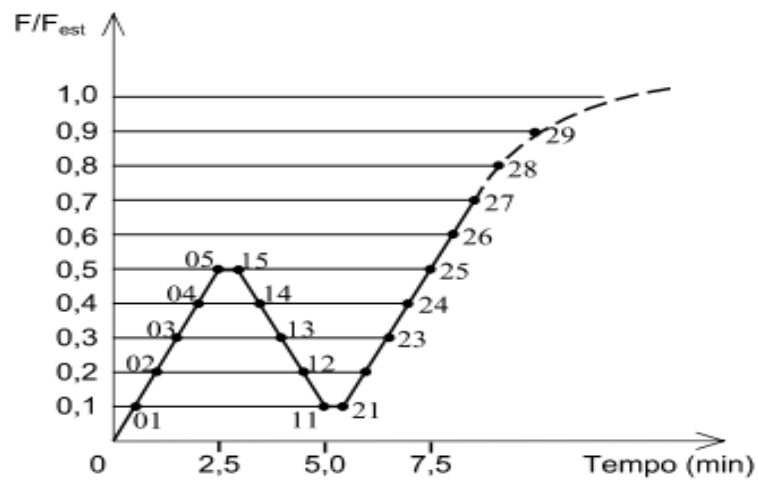
Figura 41 – Ensaio de cisalhamento da ligação.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 mostra a forma de aplicação do carregamento para o ensaio dos corpos de prova de cisalhamento.

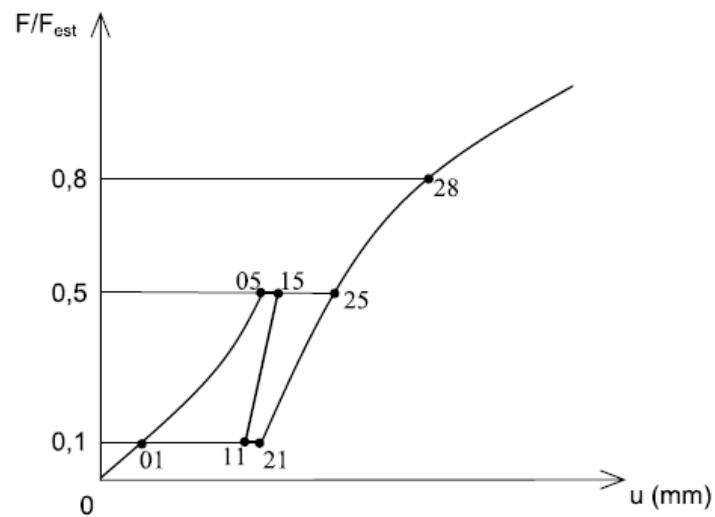
Figura 42– Forma de aplicação do carregamento no ensaio do corpo de prova com corte duplo (*double shear*).



Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

Para a medida dos deslizamentos (deslocamentos) nos corpos de prova foi considerado também o gráfico da Figura 43.

Figura 43 – Diagrama Força versus deslizamento.



Fonte: ABNT NBR 7190-2: 2022.

Foram determinados os seguintes parâmetros (a) a (j) com base nos gráficos das Figuras 42 e 43. Para o gráfico da Figura 43 foram registrados os seguintes deslizamentos: u_{01} , u_{05} , u_{15} , u_{11} , u_{21} , u_{25} e u_{28} .

- a) Força máxima: $F_{\max}$
- b) Força máxima estimada: $F_{\max, \text{est}}$
- c) Deslizamento inicial $\rightarrow u_i = u_{05}$
- d) Deslizamento inicial modificado: $u_{i, \text{mod}} = (5/4) \cdot (u_{05} - u_{01})$
- e) Acomodação da ligação: $u_s = u_i - u_{i, \text{mod}}$
- f) Deslizamento elástico: $u_e = (5/8) \cdot (u_{15} + u_{25} - u_{11} - u_{21})$
- g) Módulo de deslizamento inicial: $k_i = 0,5F_{\text{est}}/u_i$
- h) Módulo de deslizamento: $k_s = 0,5F_{\text{est}}/u_{i, \text{mod}}$
- i) Deslizamento para $0,8.F_{\max}$: $u_{0,8}$
- j) Deslizamento para $0,8.F_{\max}$ modificado: $u_{0,8 \text{mod}} = u_{0,8} - u_{25} - u_{i, \text{mod}}$

Os valores calculados em (i) e (j) foram relativos ao valor real da força $F_{\max}$ obtida em cada um dos ensaios. Os módulos de deslizamento K da ligação (rigidez) foram obtidos pelos itens (g) e (h).

5.5 Análise numérica

A simulação numérica do comportamento do elemento na flexão foi realizada no *software* RFEM versão de teste que tem como base o MEF.

Por simplicidade, pelo fato de não se ter caracterizado completamente as propriedades da madeira que foi doada pela empresa (quantidade limitada de material), considerou-se a madeira como um material isotrópico, utilizando um modelo linear, com as seguintes propriedades elásticas para a madeira de pinus de classe C20 (classificação presente na biblioteca interna do software, baseada em versão anterior da norma ABNT NBR 7190:1997):

- Resistência a compressão (f_{c0k}) = 20 MPa;
- Resistência ao cisalhamento (f_{vk}) = 4 MPa;
- Módulo de elasticidade (E) = 3500 MPa;
- Módulo de rigidez (G) = 219 MPa;
- Coeficiente de Poisson (ν) = 0,23;
- Modelo do material = Isotrópico linear elástico;

No RFEM para consideração de um modelo tridimensional, considerou-se o eixo x como sendo a direção longitudinal das fibras da madeira, o eixo y como a direção radial e o eixo z como a direção tangencial.

A configuração geométrica do modelo numérico seguiu as mesmas dimensões experimentais do elemento de NLT ensaiado na flexão. Cada lamela continha a espessura de 50 mm e a chapa compensada foi modelado com uma espessura de 8 mm.

Os nós entre a parte superior das lamelas serradas no contato com a chapa de compensado foram considerados coincidentes.

A simulação do ensaio de flexão foi realizada com aplicação de carga em dois pontos (nos terços do vão) sendo assim a carga aplicada nas distâncias de $1/3$ do comprimento (terços do vão) em relação a extremidade.

Nas regiões dos apoios os deslocamentos foram restringidos para simular uma estrutura isostática, ou seja, em uma das extremidades todos os nós em linha tiveram suas translações impedidas (x, y e z).

Na outra extremidade os nós em linha tiveram a direção x livre e os demais graus de liberdade (em y e z) impedidos.

A força última aplicada ao modelo foi igual a 1310 kgf (força medida na célula de carga), conforme obtido na análise experimental.

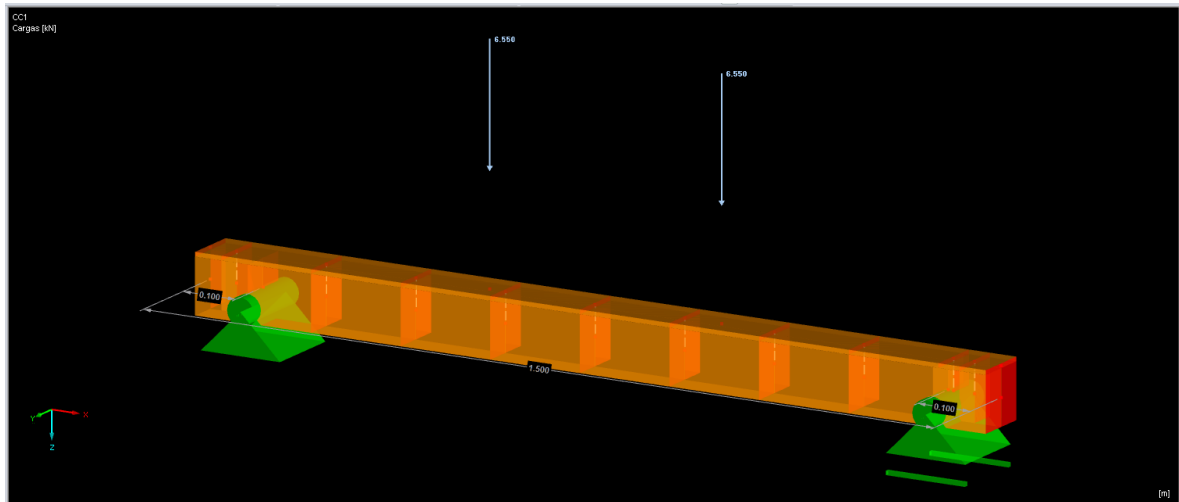
A partir do modelo numérico foi obtida a curva numérica de resposta da viga (força versus deslocamento) para calibração com a curva obtida pelo modelo experimental.

Uma vez calibrado o modelo, foi obtida a distribuição das tensões longitudinais na direção x, bem como as tensões de von Mises, utilizadas para a verificação das regiões mais solicitadas pelas tensões no modelo. A escolha desses critérios baseou-se na sua ampla aplicação em análises estruturais para materiais anisotrópicos e no objetivo de identificar pontos críticos de concentração de tensões. A tensão longitudinal permite avaliar diretamente o esforço principal na direção da fibra da madeira, enquanto a tensão de von Mises, embora mais comumente aplicada a materiais dúcteis, foi empregada de forma complementar para mapear regiões de alta solicitação global. Outros critérios poderiam ser considerados, como a tensão cisalhante máxima ou os critérios específicos para falha em materiais frágeis ou ortotrópicos, como o critério de Tsai–Hill ou Tsai–Wu, porém não foram adotados neste estudo devido à complexidade adicional de calibração e por estarem fora do escopo inicialmente proposto.

Essas tensões buscaram justificar os modos de ruptura obtidos no ensaio experimental de flexão.

A Figura 44 mostra a configuração do elemento de MLP na flexão sendo simulado no RFEM.

Figura 44 – Simulação numérica do MLP no RFEM.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software RFEM, versão 6.0.

5.6 Análise estatística dos resultados

Foram coletados dados de rigidez e resistência à flexão de dois grupos de corpos de prova: um grupo com a chapa compensada e outro sem a chapa. Cada grupo foi submetido aos mesmos procedimentos de teste para garantir a comparabilidade dos resultados.

Para verificar se os dados seguiam uma distribuição normal, foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk. O p-valor obtido foi de 0,122. Como esse valor é superior ao nível de significância de 0,05, não se rejeitou a hipótese nula de normalidade, indicando que os dados seguem uma distribuição normal. Diante disso, foi possível utilizar testes paramétricos para a análise estatística subsequente, sendo adotado o teste t para comparação entre os grupos avaliados:

- ✓ Rigidez: Para comparar a rigidez dos corpos de prova com e sem chapa compensada, foi realizado um teste t para amostras independentes. Nesse caso, H_0 (Hipótese Nula) considerou que a rigidez dos corpos de prova com chapa compensada era igual à rigidez dos corpos de prova sem chapa compensada. H_1 (Hipótese Alternativa) considerou que a rigidez dos corpos de prova com chapa compensada não era igual à rigidez dos corpos de prova sem chapa compensada.
- ✓ Resistência à Flexão: O mesmo teste t foi utilizado para comparar a resistência à flexão. Considerou-se H_0 (Hipótese Nula) de que a resistência à flexão dos corpos

de prova com chapa compensada era igual à resistência à flexão dos corpos de prova sem chapa compensada. H1 (Hipótese Alternativa) considerou que a resistência à flexão dos corpos de prova com chapa compensada não era igual à resistência à flexão dos corpos de prova sem chapa compensada.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das lamelas como também os resultados de resistência e rigidez dos corpos de prova de cisalhamento e das vigas na flexão como também os resultados das simulações numéricas. Em cada seção dos resultados, são apresentados os comentários mais relevantes e as respectivas discussões.

6.1 Caracterização das lamelas

A primeira informação obtida para as lamelas de madeira foi o Teor de Umidade. No total avaliou-se um total de 18 lamelas e esse resultado está apresentados na Tabelas 3.

Tabela 3 – Teor de Umidade das Lamelas.

Lamela 1,5 m	TU	Lamela 1,5 m	TU	Lamela 0,3 m	TU	Lamela 0,3 m	TU
L1	11%	L10	12%	L1	13%	L10	14%
L2	13%	L11	12%	L2	13%	L11	12%
L3	12%	L12	12%	L3	12%	L12	13%
L4	12%	L13	12%	L4	12%	L13	13%
L5	12%	L14	12%	L5	12%	L14	13%
L6	14%	L15	13%	L6	13%	L15	12%
L7	11%	L16	14%	L7	12%	L16	12%
L8	13%	L17	12%	L8	12%	L17	12%
L9	13%	L18	12%	L9	12%	L18	12%

Fonte: Produção do próprio autor.

Na caracterização das propriedades lamelas (classificação mecânica), a Tabela 4 apresenta as informações relativas ao modulo de elasticidade obtido na flexão através de ensaios não destrutivos.

Tabela 4 – Classificação mecânica das lamelas 0,05 x 0,10 x 1,5 m.

Lamelas 0,05 x 0,10 x 1,5 m	Moe (MPa)	Lamelas 0,05 x 0,10 x 1,5 m	MOE (MPa)
L1	848	L9	1360
L2	812	L10	775
L3	890	L11	950
L4	711	L12	1089
L5	1083	L13	1326
L6	661	L14	1164
L7	908	L15	1186
L8	646	L16	1482

Fonte: Produção do próprio autor.

Após a obtenção do TU foram obtidas as classificações das lamelas. As Tabelas 5 e 6 apresentam as informações obtidas nas avaliações das lamelas acerca dos parâmetros de classificação visual, sendo analisado os nós, inclinação das fibras, fissuras, encurvamento, encanoamento, torcimento e esmoados.

Tabela 5 – Classificação visual das lamelas 0,05 x 0,10 x 1,5 m.

Lamela	Classe
L1	3
L2	3
L3	3
L4	3
L5	1
L6	3
L7	3
L8	2
L9	1
L10	3
L11	3
L12	1
L13	2
L14	1
L15	1
L16	1
L17	1
L18	1

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6 – Classificação visual das lamelas 0,05 x 0,10 x 0,3 m.

Lamela	Classe
L1	1
L2	1
L3	2
L4	2
L5	1
L6	1
L7	2
L8	1
L9	1
L10	1
L11	2
L12	2
L13	1
L14	2
L15	1
L16	1
L17	1
L18	1

Fonte: Produção do próprio autor.

6.2 Ensaio de cisalhamento do corpo de prova

A partir do ensaio de cisalhamento dos corpos de prova foram obtidos os dados (força e deslocamentos) e calculados os parâmetros para a obtenção do módulo de deslizamento da ligação (k_s), conforme apresentados na Tabela 7. Vale mencionar que o CP1 foi utilizado para obter a carga estimada, que foi de 4500 kgf.

Tabela 7 – Parâmetros obtidos nos ensaios de resistência da ligação dos corpos de prova.

	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média	DP	CV
Força máxima (N)	5590	5657	4693	4801	4096	4967	66,88	13,21%
Força máxima estimada (N)	4414	4414	4414	4414	4414	4414	0	-
Deslizamento inicial (mm)	0,685	0,724	0,812	1,62	0,848	0,938	0,386	41,26%
Deslizamento inicial modificado (mm)	0,835	0,876	0,456	0,872	0,521	0,712	0,206	28,92%
Acomodação da ligação (mm)	0,150	0,152	0,356	0,747	0,327	0,346	0,243	70,32%
Deslizamento elástico (mm)	0,797	0,701	0,091	0,062	0,550	0,440	0,343	78,06%
Módulo de deslizamento inicial $k_i = 0,5F_{est}/u_i$ (N/mm)	3222	3049	2718	1363	2601	2591	74,44	28,19%
Módulo de deslizamento $k_s = 0,5F_{est}/u_{i,mod}$ (N/mm)	2643	2519	4839	2529	4234	3353	112,41	32,89%
Deslizamento para $0,8 F_{max}$ (mm)	1,310	5,918	9,616	1,853	3,395	4,418	3,411	77,21%
Deslizamento para $0,8 F_{max}$ modificado (mm)	1,319	6,359	9,045	0,9155	2,513	4,030	3,532	87,66%

Fonte: Produção do próprio autor.

Na análise do deslizamento da ligação, quando se analisou a resistência ao deslizamento em ligações de madeira, a principal preocupação foi com a capacidade da ligação de manter sua integridade estrutural sob cargas que tendem a causar movimento relativo entre as peças. Esta resistência é crucial para garantir a estabilidade e segurança da estrutura.

No comportamento do prego em relação à madeira, a falha na ligação se deu ou por embutimento do prego na madeira ou por flexão do prego. O embutimento do prego é a falha que ocorre quando o prego esmaga a madeira de fora localizada de maneira que compromete a sua função de união. Em outras palavras, a madeira pode deformar-se ao redor do prego, causando uma falha na conexão. Por outro lado, a flexão do prego é a falha devido à tensão excessiva do prego sob carga ultrapassando o seu limite de escoamento. Quando a força aplicada ao prego é maior do que a sua capacidade de suporta-la, o prego se curva-se, o que pode resultar na falha da ligação entre as peças de madeira. No ensaio experimental, o deslizamento entre as lamelas de madeira ocorreu predominantemente por falhas devidas ao embutimento do prego na madeira.

Quanto maior o módulo de deslizamento k_s , maior será a inclinação da curva força versus deslizamento de resposta do ensaio. Isso significa que uma ligação com um módulo de deslizamento mais alto geralmente terá uma capacidade maior de resistir às forças de cisalhamento nas ligações pregadas com baixos deslizamentos. O módulo de deslizamento influencia diretamente a rigidez da ligação da madeira pregada, pois está relacionado à capacidade da madeira de resistir ao deslizamento nas interfaces ao redor dos fixadores, como pregos e parafusos.

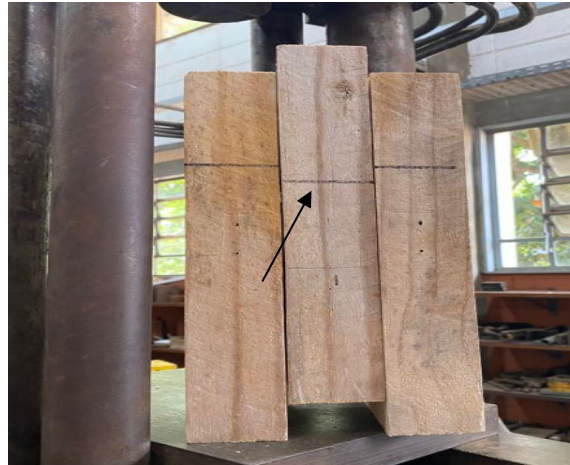
O módulo de deslizamento médio (k_s) obtido experimentalmente para a ligação do corpo de prova foi de 3353 N/mm, um valor relativamente baixo em comparação com outros estudos. Silva e Trindade (2023) dimensionaram elementos de ligação para estruturas de madeira, utilizando *Goupia Glabra* e pregos metálicos de diâmetro de 7,6 mm e resistência última de 600 MPa, obtendo um k_s de 54993 N/mm. No entanto, as espécies são diferentes, sendo uma conífera e a outra folhosa, embora a resistência última dos pinos seja a mesma. O número de pregos e de planos de corte também tem grande influência nos resultados. Em uma segunda análise verificando a rigidez por plano de corte e como tem-se três planos de corte é dividido k_s por três e assim tem-se 1118 N/mm, ou seja, para um plano de corte a rigidez é de 1118 N/mm.

Em se tratando da ligação de madeira pregada, a resistência está relacionada à capacidade dos fixadores em manter a posição relativa das peças de madeira sob carga. Quanto maior for a resistência ao deslizamento, mais estável será a ligação e menos movimento relativo haverá entre as peças.

A resistência média experimental obtida para a ligação efetuada nos corpos de prova de cisalhamento foi de 4,98 kN, sendo este um valor aproximadamente dez vezes inferior ao obtido no estudo de Silva e Trindade (2023), que registraram uma média de 42,10 kN. Essa diferença significativa pode ser atribuída, principalmente, à espécie de madeira utilizada nos ensaios, visto que propriedades mecânicas como resistência ao cisalhamento variam consideravelmente entre diferentes madeiras.

Analisando a resistência da ligação por plano de corte e dividindo-se esse valor pelo número de planos de corte — que são três — obteve-se uma média de 1,66 kN por plano. Na Figura 45, é possível observar o deslizamento das peças no momento do rompimento; a linha central, em comparação com as laterais, evidencia um deslizamento limite de 15 mm.

Figura 45 – Deslizamento limite de 5 mm.



Fonte: Produção do próprio autor.

6.3 Ensaio de flexão das vigas de MLP

A partir dos ensaios de flexão foram obtidos os Módulos de Elasticidade na flexão dos elementos de MLP sendo que os referidos valores obtidos estão apresentados na Tabela 8 e 9. O CP1 foi utilizado para obter a carga estimada de 1310 kgf. Posteriormente foi obtido o valor da rigidez EI do painel a partir da multiplicação do módulo de elasticidade E_0 obtido pelo momento de inércia da seção transversal da viga de MLP. O valor de EI para a viga analisada nesta pesquisa foi comparada com o valor obtido por Jorge (2022).

Tabela 8 – Módulo de elasticidade e resistências a flexão das peças de MLP.

	Corpos de prova	E_0 (MPa)	f_m (MPa)	$E_0.I$ (GPa)
Com chapa compensada	CP2	615	23	512
	CP3	600	31	500
	CP4	741	39	617
	CP5	725	30	604
	CP6	477	21	397
Média	-	632	29	526
DP	-	95,7	6,41	94,8
CV	-	15	22%	18%

Fonte: Produção do próprio autor.

Os baixos valores do módulo de elasticidade na flexão podem estar associados a baixa relação $L/h < 21$, uma vez que maiores deslocamentos devido a flexão + cisalhamento resultam em menores valores de módulo de elasticidade na flexão.

Tabela 9 – Módulo de elasticidade e resistências a flexão das peças de MLP.

	Corpos de prova	E_0 (MPa)	f_m (MPa)	$E_0 I$ (GPa)
Sem chapa compensada	CP7	614	26	512
	CP8	960	30	800
Média	-	787	28	656
DP		245	3	204
CV		31%	10%	31%

Fonte: Produção do próprio autor.

As Figuras 46 e 47 apresentam os modos de ruptura predominantes obtidos nos ensaios das vigas de MLP na flexão.

Figura 46 – Ruptura no nó inferior do CP2 por tração no ensaio de flexão.



Fonte: Produção do próprio autor.

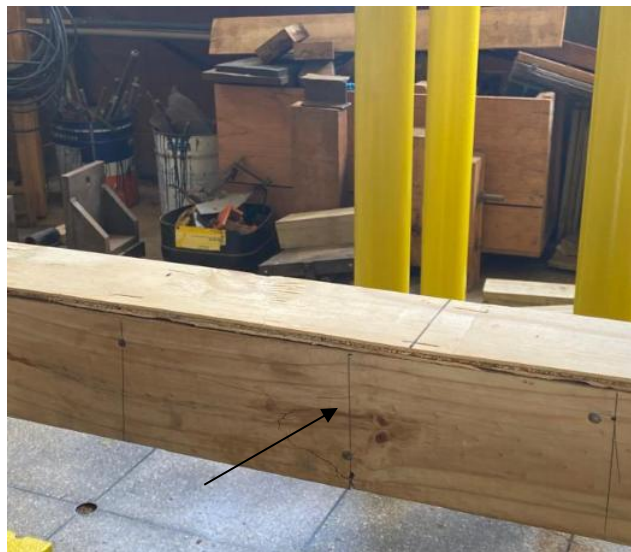
Figura 47 – Ruptura por tração inferior do CP6 no ensaio de flexão.



Fonte: Produção do próprio autor.

As rupturas predominantes das peças na flexão ocorreram por tração da parte inferior da viga, principalmente nos defeitos da madeira (nós), como previsto já que a maioria das lamelas eram classe 3, classe de menor resistência mecânica. Esse fato mostra a necessidade de classificação visual das lamelas e organização das peças de modo que os nós não fiquem na parte tracionada. Quando a ruptura não ocorreu na parte tracionada e em um defeito da madeira, observou-se ruptura próxima a linha neutra da seção devido ao esforço de cisalhamento que surgiu na seção em função da baixa relação $L/h < 21$ (Figura 48).

Figura 48 – Ruptura por cisalhamento na LN da seção para o CP5 no ensaio de flexão.



Fonte: Produção do próprio autor.

O CP8, que apresentou uma classificação visual e mecânica superior aos demais corpos de prova, foi ensaiado sem a chapa de compensado e obteve o melhor desempenho nos testes de flexão, mostrando que a classificação visual e utilização de peças de maior módulo de elasticidade colabora no aumento da resistência e rigidez do painel sendo esta influencia superior ao uso da chapa de compensado. A Figura 49 mostra o estado do corpo de prova após a ruptura.

Figura 49 – Modo de ruptura por tração inferior no CP8 no ensaio de flexão.



Fonte: Produção do próprio autor.

Com base nos resultados é nítido que a classificação das lamelas influenciou nos resultados mais do que a adição da chapa compensada na superfície, já que o primeiro ponto observado foi que CP8 que não possuía a chapa de compensado obteve melhor desempenho do que os demais corpos de prova incluindo os que continham a chapa de compensado.

Contudo, o módulo de elasticidade médio dos painéis com chapa de compensado foi de 632 MPa, sendo este valor menor que aqueles obtidos para os painéis MLP sem uso de chapas de compensado cujo módulo de elasticidade médio foi de 787 MPa. Consequentemente os valores de rigidez $E_0.I$ acompanharam essas diferenças entre as vigas com e sem chapas de compensado.

De acordo com Jorge (2022), esse fato também pode ser observado com a adição de uma chapa OSB, que não teve uma influência significativa na rigidez à estabilidade torcional do elemento, quando o painel foi submetido a flexão, com aumento do número de lamelas na seção transversal. Tem-se, neste caso, um tipo de ligação semirrígida entre a parte superior das lamelas em contato com a chapa de OSB (Figura 50). Outra vez é importante reforçar a necessidade da classificação visual das lamelas para evitar que peças com defeitos possam ser colocadas na parte inferior e nas laterais dos painéis o que favorece a rigidez torcional da seção no caso de ruptura por flexão.

Com essa análise é nítido que a adição de uma chapa de compensado à superfície superior das lamelas do elemento de MLP se faz para melhorar a movimentação do painel em sua logística.

Figura 50 – Painel de MLP com maior número de lamelas na seção submetido a flexão.



Fonte: Jorge (2022).

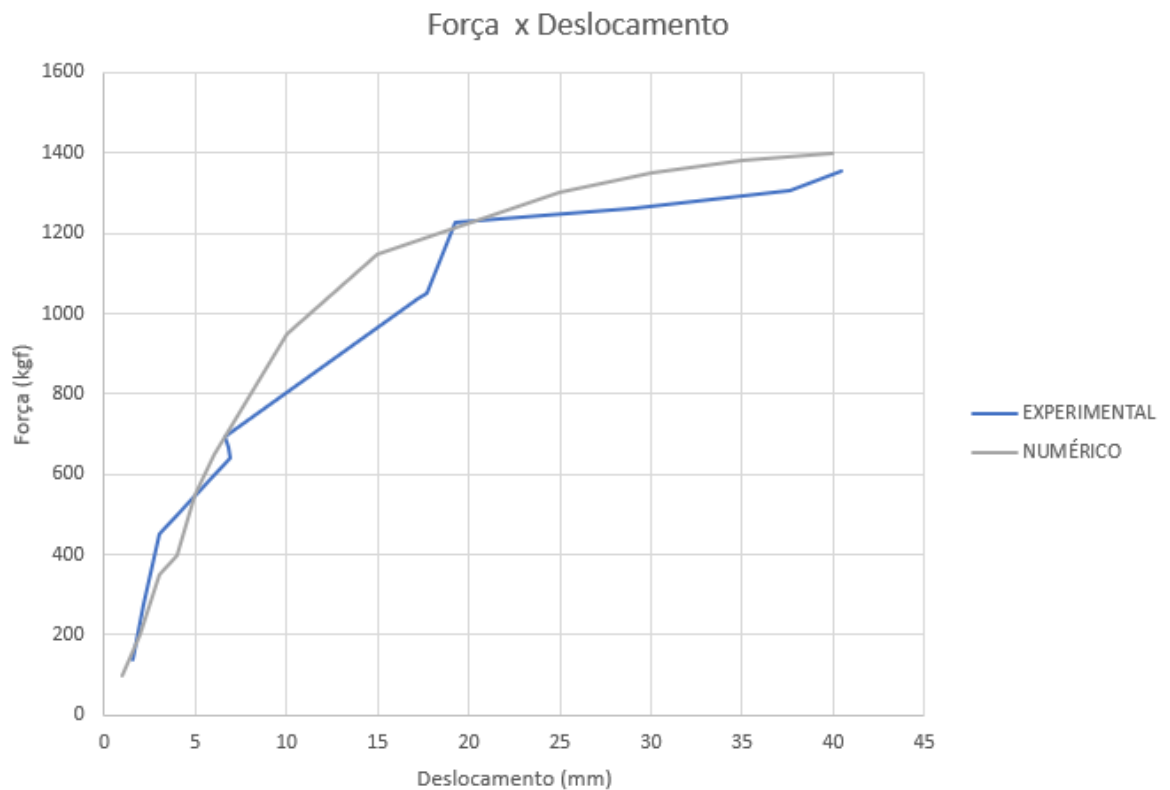
Observou-se na Figura 50 o torcimento da seção transversal dos painéis de MLP após o ensaio de flexão realizado até a ruptura.

Comparando os resultados de Jorge (2022), que analisou um painel de MLP com dimensões de 0,51 x 0,10 x 1,70 m como uma placa biapoiada e obteve uma rigidez à flexão de 137,6 GPa e uma resistência à flexão de 8,63 MPa, verificou-se que a rigidez EI obtida por Jorge (2022) foi quatro vezes menor e a resistência três vezes menor do que as obtidas nos ensaios experimentais da presente pesquisa. Isso se deve a relação $L/h = 13$ admitida na presente pesquisa contra $L/h = 17$ utilizada na pesquisa de Jorge (2022).

6.4 Simulação numérica no RFEM

A calibração do modelo numérico com o modelo experimental foi feita com base na curva de resposta força versus deslocamento considerando um nó inferior no centro do vão das vigas onde foi posicionado o transdutor de deslocamento LVDT. Na Figura 51 é possível observar a comparação dos valores médios de ambas as séries de ensaios experimental e numérica na curva da Força x Deslocamento.

Figura 51 –Curva de calibração do modelo numérico.



Fonte: Produção do próprio autor.

Observou-se que as curvas numérica e experimental obtiveram uma boa concordância entre si até valores obtidos próximos da ruptura, mesmo utilizando-se um modelo elástico linear isotrópico para representar a viga ensaiada. Até aproximadamente 500 kgf os valores experimentais foram superiores aos numéricos e a partir desse ponto de carga os valores numéricos foram maiores que os valores experimentais, principalmente por se tratar de um modelo linear e por mais que se refine a malha de elementos finitos não se tem melhora na resposta da curva força versus deslocamento. Observou-se assim o fenômeno conhecido como travamento volumétrico devido a simplicidade do elemento finito sólido utilizado na representação da madeira.

Para avaliar o erro associado entre os resultados obtidos numericamente e experimentalmente, foi realizada uma comparação entre as curvas de resposta força × deslocamento apresentadas na Figura 51. Os dados foram extraídos visualmente em pontos representativos das duas curvas. O método adotado para quantificação do erro foi o cálculo do Erro Médio Quadrático (RMSE – Root Mean Square Error), que representa a média dos desvios quadráticos entre os valores simulados e os valores observados. Esse método é amplamente utilizado para verificar o grau de aproximação entre modelos numéricos e dados

reais. O valor de RMSE obtido foi de 42,5 kgf, considerado baixo em relação ao intervalo total de força aplicado no ensaio, que atingiu valores próximos de 1400 kgf. Adicionalmente, foi calculado o erro relativo ponto a ponto, sendo identificado um erro relativo máximo de 12,5% no início do ensaio (deslocamento de 2,5 mm), o que é comum devido a instabilidades iniciais ou folgas de montagem.

A partir de 10 mm de deslocamento, a média do erro caiu para valores inferiores a 5%, indicando maior aderência entre os dados. Também foi calculado o coeficiente de determinação (R^2), que resultou em 0,991, evidenciando que o modelo numérico está muito bem calibrado e é capaz de reproduzir com fidelidade o comportamento observado experimentalmente.

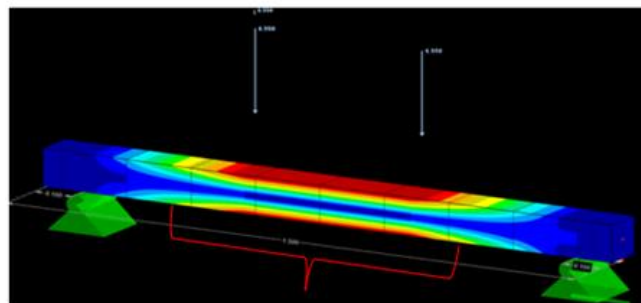
A Figura 52 apresenta a comparação entre os resultados dos modos de ruptura obtidos nos ensaios experimentais flexão com os resultados das tensões numéricas obtidas no RFEM. O máximo valor da tensão numérica obtida *software* foi de 21,5 MPa, sendo o valor médio experimental da resistência à flexão do painel com chapa de compensado foi de 28 MPa, o que representou uma diferença 23% no valor da tensão de ruptura do painel. Essas diferenças foram, sobretudo, observadas, devido a simplicidade do modelo utilizado na modelagem do painel.

Figura 52 – Comparação de regiões de rompimento do MLP experimental x simulação: (a) Ensaio experimental; (b) Simulação numérica no *software* RFEM, versão 6.0.



Região de tensão de tração em que ocorreu o rompimento experimental.

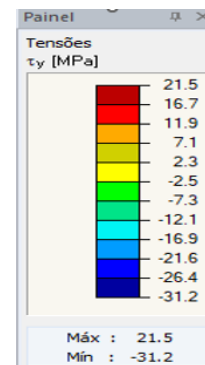
(a)



Região de tensão de tração em que ocorreu o rompimento na simulação.

(b)

Valor
experimental
 $f_m = 29 \text{ MPa}$



Fonte: Produção do próprio autor.

Observou-se ainda a partir do modelo numérico que as solicitações de tensão variaram ao longo do comprimento do elemento e a tensão máxima obtida na simulação foi de 21,5 MPa. A análise das tensões na direção longitudinal x, considerada como direção paralela às fibras no modelo proposto, mostrou as regiões mais solicitadas do modelo, tanto na tração das fibras das lamelas inferiores como também na compressão das fibras superiores no ponto de aplicação da carga com o painel compensado. O modo de ruptura experimental da maioria dos elementos de MLP apesar de terem ocorrido no meio do vão na parte inferior da peça, assim como o da simulação os rompimentos prevaleceram na maioria nos defeitos da madeira.

Vale mencionar que segundo Molina (2008), a modelagem da madeira não é uma tarefa simples, devido existência de imperfeições como distorções na direção das fibras e presença dos nós. Que influenciam no seu comportamento. Geralmente a madeira é caracterizada por três direções ortogonais, ou seja, direção paralela as fibras, tangencial e

radial, tendo cada uma das direções propriedades mecânicas diferentes das outras duas direções como também comportamentos diferentes na tração e na compressão. Na compressão o comportamento da madeira é relativamente plástico podendo ser aproximado por uma lei constitutiva elasto-plástica com endurecimento. Na tração o comportamento da madeira é frágil e neste caso o modelo elasto-plástico não representa verdadeiramente o comportamento do material.

Por fim na caracterização da madeira foram utilizados valores aproximados para as propriedades do material disponível o que pode ter também contribuído para a diferença entre os resultados.

6.5 Análise estatística do ensaio de flexão

Foram analisadas a rigidez e a resistência à flexão, comparando os corpos de prova que receberam a chapa compensada com aqueles que não receberam a chapa compensada. A primeira análise realizada foi a de normalidade dos dados, onde foi verificado que o valor do p-valor de 0,122 para os dados da rigidez e 0,685 para os dados da resistência a flexão, valores superiores a 0,05, o que indicou que os dados seguem uma distribuição normal.

Para verificar se a rigidez dos corpos de prova com a chapa foi igual à rigidez dos corpos de prova sem a chapa, foi utilizado o teste t. O p-valor obtido foi de 0,179, valor este superior a 0,05, que indicou que não houve uma diferença significativa entre as médias (Valores de rigidez dos corpos de prova com e sem chapa compensada na extremidade). A mesma análise foi realizada para a resistência à flexão, e o p-valor obtido foi de 0,84, mostrando que as médias também não diferiram significativamente (Valores de resistência a flexão dos corpos de prova com e sem chapa compensada na extremidade).

Assim, a adição da chapa compensada não influenciou de maneira significativa o comportamento dos elementos ensaiados na flexão

7 CONCLUSÃO

O levantamento bibliográfico mostrou que os painéis de Madeira Lamelada Pregada (MLP) já foram fabricados e testados no exterior. No entanto, no Brasil, há uma carência de estudos publicados e de normas específicas para este produto, principalmente no que se refere aos processos de fabricação e métodos de ensaios para avaliação do comportamento estrutural do elemento. É necessário, portanto, iniciar pesquisas nacionais com espécies de madeira brasileiras e com conectores nacionais para propor processos de fabricação e de ensaios adequados à realidade brasileira.

A norma ABNT NBR 7190: 2022, revisada recentemente, recomenda análises e ensaios para a classificação visual e mecânica de lamelas de MLC e MLCC, que podem também ser aplicadas ao MLP. Essas referidas normas também recomendam ensaios para determinação das propriedades mecânicas do MLC e MLCC que também podem ser aplicáveis ao MLP como ponto de partida.

Para as ligações desse painel, pode-se utilizar as recomendações e arranjos com pinos segundo a ABNT NBR 7190-5: 2022, pois também não há uma norma específica para as ligações do painel MLP.

Os principais ensaios recomendados para a MLP são os ensaios de flexão e os ensaios em corpos de prova *double shear* para analisar a resistência da ligação e a rigidez do sistema.

Na análise da resistência da ligação o módulo de deslizamento K_s para um plano de corte do prego no corpo de prova de cisalhamento, foi igual a 1118 N/mm. A resistência total da ligação pregada do corpo de prova, importante para a estabilidade do sistema como um todo, foi de 4,98 kN. A resistência por plano de corte a resistência obtida foi de 1,66 kN.

Já o ensaio de flexão apresentou uma rigidez EI média de 526 MPa e 656 MPa, respectivamente, para as amostras com e sem a chapa compensada. O valor superior de rigidez das amostras ensaiadas na flexão sem a chapa compensada mostrou que a classificação visual e a resistência das lamelas influenciaram nos resultados. Além disso como a relação $L/h < 21$ mostrou que as rupturas ocorreram se não nos defeitos (nós) na linha neutra.

As resistências a flexão médias foram de 29 MPa e 28 MPa para as amostras fletidas com e sem a chapa compensada respectivamente.

Os resultados dos ensaios de flexão que sugerem que a classificação visual das lamelas tem uma influência significativa no desempenho das peças que compõem o painel de MLP, superando até mesmo o efeito da adição de chapa compensada na superfície. No

entanto, a adição da chapa à superfície do elemento de MLP é crucial para sua movimentação durante o transporte e montagem, especialmente em elementos estruturais de grandes dimensões.

Na análise estatística, verificou-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistência e de rigidez e flexão das amostras com e sem chapa compensada.

A simulação numérica realizada mostrou que a resistência a flexão foi de 22 MPa, valores próximos aos obtidos experimentalmente.

Portanto, apesar da falta de literatura sobre o material MLP, existem bases que podem ser utilizadas para o início dos estudos e, posteriormente, uma padronização e regulamentação da fabricação, aplicação e montagem do material.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Teste de painéis de MLP com dimensões de placas e de vigas para comparação dos resultados tendo a relação $L/h > 21$;
- Determinação da resistência ao arrancamento dos pregos da madeira;
- Caracterização experimental completa de todos os materiais usados no painel;
- Utilização de modelo numérico não linear com ortotropia e consideração de critérios de falha para os materiais;
- Avaliação dos painéis MLP com pregos de madeira.

REFERÊNCIAS

- ALAM, P.; ANSELL, M. The effects of varying nailing density upon the flexural properties of flitch beams. **Journal of Civil Engineering Research**, Rosemead, v. 2, n. 1, p. 7-13, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5923/j.jce.20120201.02>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- AMERICAN WOOD COUNCIL. **ANSI/AWC NDS**: national design specification for wood construction. Washington, DC: American Wood Council, 2018.
- AMERICAN WOOD COUNCIL. **ANSI/AWC SDPWS**: special design provisions for wind and seismic. Washington, DC: American Wood Council, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4761-13**: standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material. West Conshohocken, PA: ASTM, 2013.
- BORYS, M.; PEI, S. **Mass timber in North America**: expanding the possibilities of wood building design. Washington, DC: American Wood Council, 2020.
- BONATELLI, C. Startup Urbem, de madeira para obras, recebe aporte de R\$ 103 milhões. **Estadão**, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/link/inovacao/startup-urbem-de-madeira-para-obras-recebe-aporte-de-r-103-milhoes/>. Acesso em: 20 maio 2022.
- BUCK, D.; WANG, X.; HAGMAN, O.; GUSTAFSSON, A. Further development of Cross-laminated timber (CLT): mechanical tests on 45 alternating layers. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2016, Vienna. **Proceedings** [...]. Vienna: Vienna University of Technology, 2016. p. 22–25.
- CANADIAN DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDE. **Nail laminated timber**: v. 1.1. Canadá, 2019. Disponível em: http://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/NLT_Canadian_Design_Construction_Guide.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1995-1-1**: EUROCODE 5: design of timber structures. Bruxelas: CEN, 1993.
- CROSSLAM. **Produtos**: CLT - Cross Laminated Timber. Suzano: CROSSLAM, [2021]. Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/clt/>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- DENGOCHOCOLATES. **Edifício Dengo**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://dengochocholates.com.br>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- DERIKVAND, M.; KOTLAREWSKI, N.; LEE, M.; JIAO, H.; CHAN, A.; NOLAN, G. Short-term and long-term bending properties of nail-laminated timber constructed of

fast-grown plantation eucalypt. **Construction and Building Materials**, London, v. 211, p. 952–964, 2019.

DLUBAL SOFTWARE GMBH. **RFEM**: user manual and theory manual: structural analysis software for finite element modeling (Version 6). Tiefenbach: Dlubal Software GmbH, 2023. Disponível em: <https://www.dlubal.com/en/products/rfem>. Acesso em: 12 fev. 2022.

EKHOLM, K. **Performance of stress-laminated timber bridge deck**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Gothenburg, Suécia, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-1:2004+A2:2014**: Eurocode 5: design of timber structures: part 1-1: general: common rules and rules for buildings. Bruxelas: CEN, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 408:199**: timber structures : structural timber and glued laminated timber: determination of some physical and mechanical properties. Bruxelas: CEN, 1995.

ESPINOZA, O.; BUEHLMANN, U.; SMITH, B. Forest certification and green building standards: overview and use in the U.S. hardwood industry. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 137, p. 1255–1262, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.081>. Acesso em: 12 fev. 2022.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.

FPINNOVATIONS. **Nail-laminated timber design and construction guide**. 2017. Disponível em: <https://www.naturallywood.com>. Acesso em: 12 fev. 2022.

GARDNER, D. J.; ROSS, R. J.; PALKA, E. J. Nondestructive evaluation of wood. *In*: FOREST Products Laboratory. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, 2006. p. 3-36.

GONG, M. Lumber-based mass timber products in construction. *In*: CONCU, G. (ed.). **Timber buildings and sustainability**. Londres: IntechOpen, 2019. p. 1-146. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.85808>. Acesso em: 12 fev. 2022.

HERBERG, E. L. **Flexural performance of nail laminated timber crane mats**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - University of Minnesota, Minneapolis, 2018.

JORGE, C. C. V. C. **Madeira Lamelada Pregada**: propriedades mecânicas de interesse e processo de fabricação. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, 2022.

KRAMER, V.; BLASS, H. J. Load carrying capacity of nail-laminated timber under concentrated loads. *In*: INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND

INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, 2001, Itália. **Proceedings** [...]. Itália: Working Commission W18 – Timber Structures, ago. 2001. Disponível em: <https://doczz.net/doc/7541114/load-carrying-capacity-of-nail>. Acesso em: 25 jan. 2022.

MAIA, B. B.; GÓES, J. L. N. Resistência de ligações pregadas em madeira (strength of nailed timber joints). In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ESTRUTURAS EM MADEIRA (CLEIM); CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE MADEIRAS (CIMAD), 2017, Buenos Aires. **Anais** [...]. Buenos Aires, 2017. p. 1-12.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Análise dinâmica de conectores verticais para tabuleiros mistos de pontes. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais** [...]. Londrina: [s.n.], 2008.

ORIGUNDE, O. **Evaluation of bending performance of nail laminated and dowel laminated timber**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University of Maine, Orono, 2019. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-bending-performance-of-nail-laminated-Ogunrinde/b840ce77c56627335af8aab917721a4170825d45>. Acesso em: 20 jun. 2022.

PEREIRA, M. C. M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Cruzada**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde07052015-084252/publico/Dissertacao.pdf>. Acesso em: 1 maio 2021.

POLLO, M. R.; AGOPYAN, V.; CALIL JUNIOR, C. A madeira engenheirada na construção civil brasileira: o caso do edifício da Dengo. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 566, p. 32–35, 2023.

REWOOD – Soluções Estruturais em Madeira. **Nossos cases**: muito + que obras: obras de arte. Taboão da Serra: Rewood, 2021. Disponível em: <https://rewood.com.br/cases>. Acesso em: 4 mar. 2022.

ROSS, R. J. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: a review. **Wood and Fiber Science**, Monona, v. 42, special issue, p. 1–17, 2010.

SIKKENS. **Cetol Deck**: manual técnico. Amsterdam: Sikkens, [2022]. Disponível em: <https://www.sikkens.com>. Acesso em: 4 mar. 2022.

STANDARDS AUSTRALIA; STANDARDS NEW ZEALAND. **AS/NZS 4063.1:2010**. characterization of structural timber: test methods. Sydney; Wellington: SA/SNZ, 2010.

THEODORAKIS, N. Mercado imobiliário aposta na madeira engenheirada para 2023. **Gazeta do Povo**: Haus Arquitetura, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/haus/arquitetura/tchau-concreto-mercado-imobiliario-aposta-na-madeira-engenheirada-para-2023/>. Acesso em: 25 mar. 2023.

VILELA, R.; MASCIA, N. T.; DONADON, B. F. Confiabilidade estrutural e simulação numérica de vigas de Madeira Lamelada Colada (MLC) reforçadas com fibra sintética. **Principia**: divulgação científica e tecnológica do IFPB, João Pessoa, n. 57, 2021.

WIDMANN, R. **Screw-laminated timber deck plates**. [2022]. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Screw-laminated-timber-deck-plates-Widmann/461c9ecf178571f4e493f933f2b98ea37c0f3332>. Acesso em: 25 jan. 2022.

ZAPARTE, T. A. **Estudo e adequação dos principais elementos do modelo canadense de construção em wood frame para o Brasil**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014. Disponível em: <https://portaldeinformacao.utfpr.edu.br/Record/riut-1-14399>. Acesso em: 10 maio 2022.