



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

BIANCA BISPO DOS REIS

**PROPOSTA DE UM COMPONENTE DE LAJE EM MADEIRA
LAMELADA SERRADA COM PROTENSÃO TRANSVERSAL
UTILIZANDO ESTRATÉGIA DE DESLOCAMENTO
VERTICAL INTERCALADO DE SUAS LÂMINAS**

Londrina
2023

BIANCA BISPO DOS REIS

**PROPOSTA DE UM COMPONENTE DE LAJE EM MADEIRA
LAMELADA SERRADA COM PROTENSÃO TRANSVERSAL
UTILIZANDO ESTRATÉGIA DE DESLOCAMENTO
VERTICAL INTERCALADO DE SUAS LÂMINAS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Mestre no Programa de Pós Graduação em Metodologia de Projeto, área de concentração em Arquitetura e Urbanismo no Centro de Tecnologia e Urbanismo

Orientador: Prof. Jorge Daniel de Melo Moura

Coorientador: Prof. Everaldo Pletz

Londrina
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

R375p Reis, Bianca Bispo dos.
PROPOSTA DE UM COMPONENTE DE LAJE EM MADEIRA LAMELADA SERRADA COM PROTENSÃO TRANSVERSAL UTILIZANDO ESTRATÉGIA DE DESLOCAMENTO VERTICAL INTERCALADO DE SUAS LÂMINAS / Bianca Bispo dos Reis. - Londrina, 2023.
116 f. : il.

Orientador: Jorge Daniel de Melo Moura.
Coorientador: Everaldo Pletz.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2023.
Inclui bibliografia.

1. Madeira laminada protendida - Tese. 2. protensão transversal - Tese. 3. madeira de reflorestamento; - Tese. 4. laje de madeira - Tese. I. Moura, Jorge Daniel de Melo . II. Pletz, Everaldo . III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

CDU 711/72

BIANCA BISPO DOS REIS

**PROPOSTA DE UM COMPONENTE DE LAJE EM MADEIRA
LAMELADA SERRADA COM PROTENSÃO TRANSVERSAL
UTILIZANDO ESTRATÉGIA DE DESLOCAMENTO
VERTICAL INTERCALADO DE SUAS LÂMINAS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Mestre no Programa de Pós Graduação em Metodologia de Projeto, área de concentração em Arquitetura e Urbanismo no Centro de Tecnologia e Urbanismo

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Everaldo Pletz
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Mauricio Hidemi Azuma
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. André Luis Christoforo
Universidade Federal de São Carlos -
UFDCar

Londrina, 26 de junho de 2023.

DEDICATÓRIA

À minha amada família, meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo o que tem feito em minha vida.

A minha família, meu bem maior, em especial ao meu marido Lucas por estar presente em todos os momentos dessa trajetória, me incentivando e auxiliando. Ao meu pai Claudio, por toda a ajuda e disposição em me ajudar em toda a parte experimental da pesquisa, sem você nada disso seria possível. A minha mãe Silvia, minha base e inspiração, e a minha sogra Dalci por todos os ensinamentos.

Ao meu querido orientador Prof. Dr Jorge Daniel, por estar ao meu lado em cada momento de aflição e superação, por todo companheirismo, incentivo e por acreditar em mim.

Aos técnicos de laboratório, Carlos e Luís, por toda a atenção, dedicação e ensinamentos proporcionados.

A todos os professores que estiveram nesses anos contribuindo com seus ensinamentos, em especial ao Prof. Dr Rovenir Bertola e Prof.a Dra Ercilia Hirota.

E por fim, ao meu grande amigo Vitor que fiz no PPU UEL/UEM, pelo companheirismo e auxílio.

RESUMO

As deficiências apresentadas nos pisos de assoalho de madeira, como problemas de desconforto acústico e danos às áreas mais utilizadas da estrutura, afetam negativamente a qualidade de vida dos moradores. A disposição dos elementos não garante uma distribuição uniforme de carga na estrutura, comportando-se praticamente como um conjunto de vigas independentes. Ao contrário do que ocorre em uma placa maciça, onde os esforços são distribuídos em duas direções, minimizando a transmissão de vibrações e ruídos. Diante disso, o objetivo desta pesquisa é propor um componente de laje maciça para construção civil, aplicando a tecnologia de tabuleiros de madeira laminada protendida transversalmente, utilizada apenas para a construção de passarelas e pontes. No entanto, buscando reduzir o consumo de madeira, peso e custo, esta pesquisa propõe um componente de laje com um arranjo geométrico diferente do originalmente utilizado nos tabuleiros. Foi utilizada como estratégia para melhorar o desempenho desses componentes a inclusão de deslocamentos verticais intercalados nas lâminas de sua seção transversal, a fim de aumentar a inércia do conjunto. Os resultados obtidos através dos 6 protótipos construídos apresentaram excelentes resultados, representando um grupo bastante homogêneo. Dois grupos de corpos de prova, controle e proposto, sem deslocamento vertical e com deslocamento, respectivamente, foram idealizados a fim de se comparar a diferença de desempenho às tensões de flexão entre as duas composições. Em relação ao carregamento correspondente à flecha preconizada pela norma, quando comparados aos dois grupos, observamos um aumento significativo de rigidez, em média, de 41,2%. Em termos de carga de ruptura, o grupo controle mostrou desempenho superior em 10% sobre o grupo proposto. Conclui-se, portanto, que a estratégia utilizada nesta pesquisa, mostra-se altamente eficaz, representando um começo promissor para futuras pesquisas que possam dar continuidade à proposta deste estudo

Palavras-chave: Madeira laminada protendida; protensão transversal; madeira de reflorestamento; laje de madeira.

ABSTRACT

The deficiency observed in wooden floor joist structure, such as acoustic discomfort and damage to the most used areas of the structure, negatively affects the residents' quality of life. The arrangement of the elements does not guarantee a uniform load distribution in the structure, behaving almost like a set of independent beams. Unlike a solid slab, where forces are distributed in two directions, minimizing the transmission of vibrations and noise. Therefore, the objective of this research is to propose a solid slab component for civil construction, using the technology of stress-laminated-timber deck, which is currently only used for the construction of footbridges and bridges. However, aiming to reduce wood consumption, weight, and cost, this research proposes a slab component with a different geometric arrangement from the one originally used in the boards. The inclusion of interspersed vertical displacements in the laminates of its cross-section was used as a strategy to improve the performance of these components, in order to increase the overall inertia. The results obtained through the test specimens showed excellent results. It can be stated that the test specimens have a very acceptable level of reliability, representing a fairly homogeneous group. Two groups of test specimens, Control and Proposed, without vertical displacement and with displacement, respectively, were designed to compare the difference in flexural stress performance between the two compositions. Regarding the loading corresponding to the deflection recommended by the standard, when comparing the two groups, a significant increase in stiffness, on average, of 41.2% was observed. In terms of failure load, the control group showed superior performance by 10% over the proposed group. Therefore, it can be concluded that the strategy used in this research proves to be highly effective, representing a promising starting point for future research that can further develop the proposal of this study.

Key-words: laminated timber; longitudinal stress; reforestation wood; timber slab

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de um assoalho de madeira tradicional	29
Figura 2 - Lâminas de madeira protendidas transversalmente.....	32
Figura 3 - Planta e seção transversal de tabuleiro laminado protendido	32
Figura 4 - Elevação de tabuleiro laminado protendido	33
Figura 5 - Deslocamento proposto para o componente de laje	35
Figura 6 - Seções muito ampliadas do tecido celular de arvore conífera:	37
Figura 7 - Seção transversal macroscópica da madeira.....	38
Figura 8 - Variação das propriedades da madeira juvenil dentro do tronco e com cortes de tábua.....	39
Figura 9 - Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras.....	40
Figura 10 - Retração da madeira.....	43
Figura 11 - Gráfico esquemático da resistência da madeira à tração e compressão paralela as fibras	45
Figura 12 - Tabuleiro laminado protendido.....	48
Figura 13 - Juntas de topo, a cada quatro vigas.....	49
Figura 14 - Comportamento mecânico do tabuleiro laminado protendido	49
Figura 15 - (A) Detalhe de ancoragem da ponte Hebert Creek, (B) Detalhe de ancoragem Fox Lake Roda.	51
Figura 16 - Alternativas de tabuleiros para pontes laminadas protendidas	51
Figura 17 - Tabuleiro ortotrópico treliçado protendido transversalmente.....	54
Figura 18 - tabuleiro multicelular de madeira protendida.....	55
Figura 19 - Sistemas de Protensão com Barras DYWIDAG	57
Figura 20 - Sistema de protensão utilizando Cordoalhas Engraxadas	58
Figura 21 - Perda de protensão e sistemas de reprotensão.....	59
Figura 22 - Relações entre carga x tempo (a) e deformação x tempo (b), A direita, os componentes de deformação.....	60
Figura 23 - Comportamento da fluência. (a) estágio da fluência e (b).....	61
Figura 24 - Diagrama de tensão-deformação do aço de protensão	62
Figura 25 - Relaxação do aço de protensão e gráfico de relaxação ao.....	62
Figura 26 - Arranjos experimentais com seção 35 cm.....	66
Figura 27 - Lote de madeira Pinus spp.....	68
Figura 28 - Armazenamento do lote	69

Figura 29 - Classificação visual das classes para <i>Pinus spp</i>	70
Figura 30 - Classificação Visual das peças	72
Figura 31 - Medidor de umidade DUC 2050L	72
Figura 32 - Ensaio de Flexão Estático a 3 pontos	74
Figura 33 - Gabarito de madeira	74
Figura 34 - Aferição da flecha resultante	75
Figura 35 - Módulo de elasticidade à flexão (<i>Em</i>)	76
Figura 36 - Módulo de Elasticidade dos corpos de prova	77
Figura 37 - Corpos de prova grupo controle	78
Figura 38 Corpos de prova grupo proposto	78
Figura 39 - Gabarito para furação	79
Figura 40 - Gabarito A (Dimensões em metros)	79
Figura 41 - Gabarito B (Dimensões em metros)	80
Figura 42 – Lay up das peças	81
Figura 43 - Corpos de prova.....	81
Figura 44 - Porcas sextavadas e arruelas	82
Figura 45 - Esquema ilustrativo sistema de protensão	83
Figura 46 - Aplicação da protensão	85
Figura 47 - Ordem aplicação da protensão	86
Figura 48 - Esmagamento lâmina.....	86
Figura 49 - Teste de flexão a quatro pontos	87
Figura 50 - Posicionamento.....	88
Figura 51 - Perfil metálico.....	90
Figura 52 - Carregamento no L/350	92
Figura 53 - Carregamento na Ruptura	92
Figura 54 - Rigidez comparativa.....	93
Figura 55 - Deslocamento LVDTs de 50mm de todos os corpos de prova	94
Figura 56 - Corpo de prova 01.....	95
Figura 57 - Rupturas lâminas CP1	96
Figura 58 - Rupturas lâminas CP1 – Detalhe	96
Figura 59 - Corpo de prova 02.....	97
Figura 60 - Rupturas lâminas CP2	97
Figura 61 - Rupturas lâminas CP2 – Detalhe	98
Figura 62 - Corpo de prova 03.....	98

Figura 63 - Rupturas lâminas CP3	99
Figura 64 - Rupturas lâminas CP3 - Detalhe	99
Figura 65 - Corpo de prova 04.....	100
Figura 66 - Rupturas lâminas CP4	100
Figura 67 - Rupturas lâminas CP4 – Detalhe	101
Figura 68 - Corpo de prova 05.....	101
Figura 69 - Rupturas lâminas CP5	102
Figura 70 - Rupturas lâminas CP5 - Detalhe	102
Figura 71 - Corpo de prova 06.....	103
Figura 72 - Rupturas lâminas CP6	103
Figura 73 - Rompimentos Nós.....	104
Figura 74 - Rompimentos Nós.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Preço comercial de tábuas de Pinus	34
Tabela 2 - Estimativa de altura do tabuleiro.....	56
Tabela 3 - Valores de umidades encontradas no lote de Pinus.....	73
Tabela 4 - Carregamentos obtidos.....	91
Tabela 5 - Quantidade de lâminas rompidas	105

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	Justificativa	31
1.2	Objetivo Geral.....	35
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	36
2.1	MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL.....	36
2.1.1	Características Anatômicas da Árvore.....	36
2.1.2	Propriedades Físicas	40
2.2	elemento horizontal laminado protendido transversalmente.....	48
2.2.1	Breve contexto histórico sobre tabuleiros laminados protendidos transversalmente.....	50
2.2.2	Trabalhos realizados na Escola de Engenharia de São Carlos.	52
2.2.3	Madeira para placas laminadas protendidas transversalmente	56
2.2.4	Sistema de protensão.	56
2.2.5	Perdas de protensão	58
2.2.6	Fluência na Madeira	59
2.2.7	Relaxamento do aço de protensão	61
2.3	CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	63
3	MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1	HIPÓTESE DA PESQUISA	66
3.2	MÉTODOS	67
3.3	MATERIAIS	68
3.3.1	Madeira utilizada.....	68
3.3.2	Caracterização visual das peças	69
3.3.3	CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA DAS PEÇAS	72
3.4	Montagem dos corpos de prova.	77
3.4.1	Furação	79
3.4.2	Montagem dos corpos de prova	80
3.4.3	Protensão dos protótipos.....	83
3.4.4	Reprotensão	87
3.4.5	Ensaio de Flexão em Quatro Pontos	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
4.1	MODO DE RUPTURA	95

5	CONCLUSÕES	106
6	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

As recentes crises energéticas e ambientais, aumentaram o interesse e a necessidade em substituir materiais convencionais por materiais sustentáveis na construção civil (BAZLI; HEITZMANN;ASHRAF, 2022). De acordo com o Relatório da Situação Global para Edifícios e Construção (United Nations Environment Programme, 2020), esse setor econômico foi responsável por 38% de todas as emissões de CO₂ na atmosfera e estabelece que os governos devem priorizar edifícios de baixo carbono além de atualizar seus compromissos climáticos para com o planeta.

De acordo com Wang, Toppinen e Juslin (2014), a promoção do uso da madeira na construção civil, pode contribuir de forma significativa para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável em âmbito global. Além de apresentar baixo consumo de energia em sua produção e flexibilidade no seu processo de fabricação e montagem, possui grande disponibilidade de matéria prima. Segundo o Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF), o Brasil, em 2019, possuía aproximadamente 10 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 96,1% composta pelas espécies Eucalipto e Pinus. Até 2030, o país ainda tem como meta, aumentar 20% de sua área florestal, o equivalente a cerca de 2 milhões de hectares (PLANTAR FLORESTAS, 2018).

Ademais, trata-se de um material que possui elevada relação resistência/peso sendo um excelente isolante acústico e térmico, propriedades que a tornam um material construtivo adequado para inúmeras aplicações, sobretudo, na composição de elementos estruturais, como vigas, pilares e sistemas de piso (BAZLI; HEITZMANN; ASHRAF, 2022).

Em edifícios residenciais com estrutura de madeira, em todo o mundo, os pisos de madeira estão entre os componentes estruturais mais utilizados. Dentre os sistemas de parede, telhado e piso, este é o único em que os usuários estão em contato físico direto. (HU; CHUI; ONYSKO, 2001). Tradicionalmente, os assoalhos (**Figura 1**) são compostos por tábuas dispostas ortogonalmente e fixadas através de ligações metálicas (pregos ou parafusos) em uma estrutura principal.

Figura 1 - Elementos de um assoalho de madeira tradicional



Fonte: Disponível em <https://jplixamento.com.br/servicos-de-lixamento/colocacao-de-assoalho-de-madeira>. Acesso em 10 de junho de 2023

Apesar de ser um sistema leve, de fácil construção e baixo custo, a forma de disposição dos elementos não garante uma distribuição uniforme de carga na estrutura, se comportando praticamente como um conjunto de vigas independentes. Ao contrário do que acontece em uma placa, onde os esforços são distribuídos em duas direções, quando uma carga vertical é aplicada sobre o assoalho, não há associação da estrutura como um todo, e a transmissão dos esforços, em maior proporção, acontecem para as vigas mais próximas. (VELOSO et al, 2006).

Além disto, a camada isolante de um pavimento ao outro, passa a ser uma camada de 20 mm correspondente à espessura do assoalho convencional de madeira maciça.

Como consequência, essa deficiência no desempenho do piso, pode causar danos aos locais mais solicitados da estrutura e desconfortos acústicos aos moradores. Movimentações de pessoas como caminhar, correr ou pular, e de objetos, podem criar vibrações estruturais afetando negativamente a eficiência do sistema e consequentemente, a qualidade de vida dos usuários (SOIKKELI,2022). Rodrigues (2021) ao avaliar o sistema wood frame em habitações de interesse social plurifamiliares no Paraná, que utiliza assoalhos como sistema de pisos, expõe que problemas com o desconforto acústico são relatados. Em 62,3% dos usuários participantes da pesquisa, mencionaram o alto índice de ruídos no interior do apartamento e 71% reclamam de ruídos do pavimento superior, como passos,

conversas e movimentação de mobiliário, evidenciando assim um grande problema de conforto no sistema.

Por outro lado, os produtos de madeira engenheirada, como o Cross Laminated Timber (CLT) ou Glued Laminated Timber (Glulam), que possuem propriedades mecânicas mais homogêneas, proporcionam maior estabilidade, formação de seções estruturais maiores e mais complexas e a redução dos defeitos naturais, como nós, das peças de madeira (RAMAGE et al., 2017; ASIF, 2009 apud SOTAYO *et. al*,2020). Trata-se de uma tecnologia construtiva que tem ganhado destaque em países europeus e norte-americanos nos últimos anos, porém no Brasil, ainda é pouco difundida, existindo apenas duas empresas que a produzem, localizadas em Suzano-SP e Curitiba-PR. (ALMEIDA, SILVA, MOURA,2021).

Entretanto, estudos recentes revelam uma realidade preocupante: uma parcela substancial, chegando a até 47%, da madeira é desperdiçada durante a etapa de classificação visual na manufatura de produtos engenheirados, como o CLT. Madeiras de menor diâmetro e baixa qualidade, frequentemente exibem defeitos substanciais, sendo a torção um dos principais motivos de sua rejeição (DAVALOS JF, QIAO P, WANG J, ET AL, 2002, Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, et al 2016 apud SILVA DO CARMO,ENGLUND, LI, 2022). Essa alarmante taxa de descarte de madeira no processo de classificação visual não apenas implica em um aproveitamento ineficaz de recursos naturais, além de gerar um aumento considerável nos custos de produção. (SILVA DO CARMO,ENGLUND, LI, 2022).

Além disso, o uso de adesivos à base de petróleo contribui para a emissão de gases tóxicos, tais como compostos orgânicos voláteis (VOCs) e formaldeído, prejudicando o ciclo de vida do CLT. Essa emissão de poluentes atmosféricos não apenas tem implicações na qualidade do ar e na saúde humana, mas também agrava os desafios associados ao descarte responsável do produto, dificultando sua reutilização e reciclabilidade, conforme destacado por Sotayo em 2020. Segundo o autor, esses adesivos tornam o processo de separação e recuperação da madeira durante o descarte consideravelmente mais complexo e oneroso. Essa complexidade limita a capacidade de reciclar e reutilizar o material de forma eficiente.

Por isso, é de extrema importância a busca por novas tecnologias sustentáveis na construção civil, principalmente para o desenvolvimento de um elemento estrutural maciço para laje, que possua alta resistência, minimize a

transmissão de vibrações e ruídos, que seja sustentável de fácil execução.

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com a NBR-7190 (1997) em construções submetidas a fontes de vibração, como é o caso das residências, devem ser adotadas disposições construtivas que evitem a presença de vibrações excessivas na estrutura.

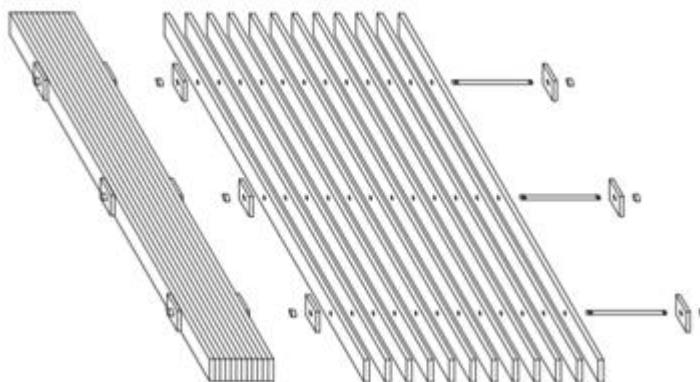
HU, CHUI e ONYSKO (2006) ao comparar diferentes abordagens de projeto, concluiu que em pisos com estrutura de madeira, as respostas as vibrações são relacionadas, principalmente por sua massa, rigidez, e a capacidade de dissipar a energia de vibração (amortecimento). Essas propriedades são, por sua vez, determinadas pelos materiais do piso, pelo projeto e pela construção.

Segundo FLEMING (2016), a tecnologia de madeira lamelada protendida transversalmente, utilizada até o momento para a construção de pontes, ao demonstrar excelente desempenho estrutural a baixo custo, quando comparados à sistemas de madeiras engenheiradas, pode ser introduzida na construção civil, como placas de piso para vãos de sentido único e, ao mesmo tempo contribuir para o aumento do escopo da construção em madeira.

Constituído por vigas de madeira serrada, dispostas paralelamente e comprimidas transversalmente através de barras de aço protendidas (**Figura 2**), essa tecnologia evita folgas entres as lamelas, bem como deslizamentos verticais entre elas, devido à força de atrito gerada pela protensão (MASSARO; MALO 2020).

Dentro desse contexto, a estratégia possibilita o uso de madeira de baixo valor agregado, pois reduz a importância dos defeitos localizados nas peças. A estrutura passa a se comportar como uma placa ortotrópica, reduzindo a importância de defeitos, como os nós, localizados nas peças (RITTER, 1990).

Figura 2 - Lâminas de madeira protendidas transversalmente

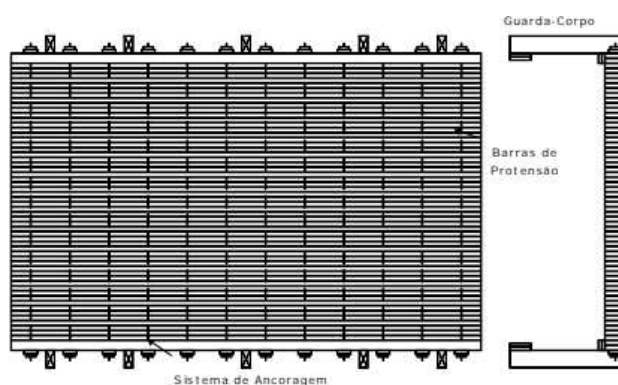


Fonte: FLEMING (2020)

Além disso, ao serem projetados e detalhados adequadamente, os elementos laminados protendidos transversalmente podem ser reparados ou substituídos com muito mais facilidade, se comparados à laminação com adesivos ou outras técnicas mecânicas, como ligações pregadas (FLEMING, 2016).

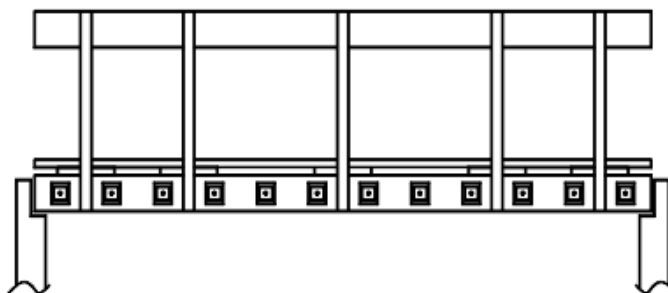
Como visto nas **Figura 3** e **Figura 4**, é uma técnica relativamente simples e eficaz para lamelar madeira e oferece diversas vantagens: não necessita de ferramentas sofisticadas, peças e mão de obra especializada, e com devido critério, pode ser executada em um canteiro de obra. Com isso, evitam-se despesas associadas a prensas de grande escala, acessórios e outras máquinas industriais (FLEMING, RAMAGE, 2020; FLEMING, 2016).

Figura 3 - Planta e seção transversal de tabuleiro



Fonte: OKIMOTO (1997)

Figura 4 - Elevação de tabuleiro laminado protendido



Fonte: OKIMOTO (1997)

Como já mencionado, trata-se de uma tecnologia que há mais de 40 anos é utilizada unicamente na construção de tabuleiros para pontes e passarelas de madeira, mas que apresenta também potencial para sua utilização na construção de edifícios.

Segundo FLEMING (2016), uma razão pela qual esse sistema ainda não foi utilizado para outros fins se deve a sua criação anterior à popularidade de produtos de madeira engenheirada, e por isso projetistas e engenheiros estruturais preferem especificar produtos importados e de alta qualidade, ao invés de desenvolver alternativas com madeira de baixa classificação. Além disso, as perdas nos níveis de protensão relacionadas à umidade e retração da madeira, em um primeiro momento, não se apresentavam confiáveis.

Como consequência, poucos estudos foram realizados para sua aplicação em estruturas que não sejam para pontes e passarelas de madeira. Ao utilizar a plataforma de pesquisa "Web of Science" com a combinação de palavras-chave "Stress laminated" AND "Timber", identificamos apenas 34 artigos relevantes. Para ampliar nossa busca e encontrar trabalhos não vinculados a pontes, foi realizada uma segunda pesquisa, excluindo a palavra "bridge" e sem restrições de período, usando a string "stress laminated" AND "timber". No entanto, essa pesquisa adicional resultou na identificação de apenas um único artigo relevante.

Apenas recentemente FLEMING e RAMAGE (2020) apresentaram um novo uso desta tecnologia, para a construção de colunas em edificações, demonstrando desempenho estrutural semelhante a colunas de madeira maciça e MLC (madeira laminada colada). Ademais, o autor ainda comprova que as preocupações com as

perdas de protensõesua consequente confiabilidade a longo prazo podem ser postas de lado. Os métodos de reprotensões encontrados e aplicados em tabuleiros de pontes na literatura, para controlar e reduzir esse problema, concorrem para a estabilização das perdas de protensão citadas nesse estudo. Sendo assim, há potencial para novas pesquisas sobre a utilização dessa tecnologia em edificações.

Dessa forma, inspirado nos tabuleiros de madeira protendida transversalmente, este estudo apresentará uma adaptação para essa tecnologia, propondo um componente de laje, e avaliará o seu desempenho para que, possa ser utilizada em edificações. É importante salientar que apenas será abordada neste estudo a análise mecânica e estrutural. Avaliações, como conforto acústico, térmico e outras questões de projeto, como a conexão a outros elementos estruturais (vigas e pilares), apenas serão estudadas após a comprovação da viabilidade da hipótese inicial, ou seja, o comportamento e o desempenho da estrutura terem sido testados e validados.

Também é importante destacar que, por ser criada para suportar grandes cargas, trata-se de uma tecnologia rústica, robusta e pesada, e o custo comercial da peça de madeira serrada aumenta substancialmente e não proporcionalmente quanto maior for sua bitola, conforme pode ser observado na **Tabela 1**.

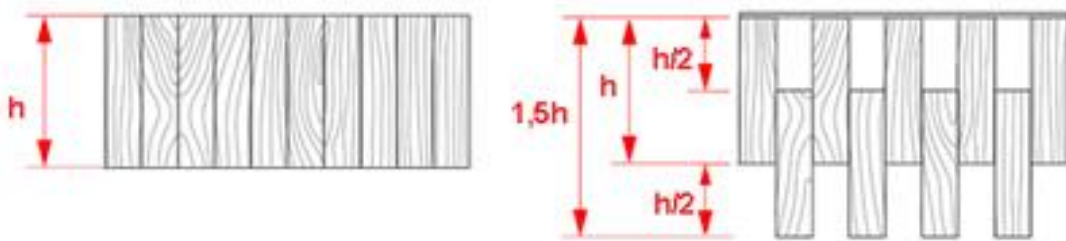
Tabela 1 - Preço comercial de tábua de Pinus

TÁBUA DE PINUS			
MEDIDAS (m)	MEDIDAS (m ³)	US\$ / unidade	US\$ / m ³
0,10x0,02x3	0,006	2,49	372,54
0,15x0,02x3	0,009	3,66	363,3
0,20x0,02x3	0,012	4,78	355,98
0,25x0,02x3	0,015	6,17	367,85
0,30x0,02x3	0,018	9,97	495,41

Fonte: Casa da Madeira. Disponível em: <https://www.casadamadeira-am.com/tabuas-para-caixaria/tabuas-de-pinus> Acesso em 18 de junho de 2023

Dessa maneira, esta pesquisa tem como objetivo a viabilização de um componente de laje maciço para construção civil, utilizando a tecnologia de madeira laminada protendida transversalmente, buscando a redução de seu consumo de madeira e, conseqüentemente, o seu peso e custo, como observado na Figura 5.

Figura 5 - Deslocamento proposto para o componente de laje



Fonte: AUTORA (2023)

Para isso, tem-se como questão norteadora deste estudo: “Como a forma de agrupamento e as dimensões das bitolas de tábuas de madeira serrada podem influenciar o comportamento de um componente de uma laje inspirada em tabuleiros de madeira protendida transversalmente?”

1.2 OBJETIVO GERAL

Propor um componente de laje, inspirado nos tabuleiros de madeira laminada protendida transversalmente, utilizando como estratégia deslocamentos verticais intercalados nas lâminas de sua seção transversal, para aumentar a Inércia do conjunto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Organizou-se a revisão de literatura de forma a discutir os assuntos contemplados neste trabalho, abrangendo duas grandes temáticas: Madeira como material estrutural (2.1) e Tabuleiro laminado protendido transversalmente (2.2).

No item 2.1 demonstra-se a importância de conhecer as propriedades básicas da madeira para entender sua influência no desempenho e resistência estrutural. A partir desse item, serão fornecidos subsídios para facilitar a compreensão dos capítulos subsequentes ao utilizá-la como material principal da tecnologia de madeira protendida transversalmente.

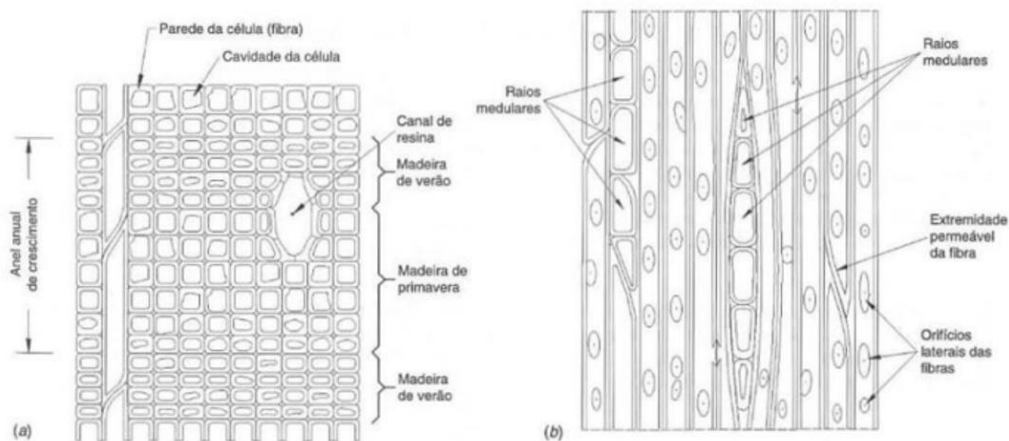
Já item o 2.2 aborda a tecnologia de tabuleiro laminado protendido transversalmente, objeto de estudo desta pesquisa. Nesse item, são apresentadas suas características construtivas, bem como materiais utilizados; um breve contexto histórico de sua criação, e seu comportamento estrutural, abrangendo a perda de protensão e fluência da madeira.

2.1 MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

2.1.1 Características Anatômicas da Árvore

A madeira é um material constituído por um arranjo de células, denominadas de fibras, que possuem propriedades específicas para o crescimento e a sustentação da árvore. Conforme **Figura 6**, podemos observar que se trata de células ocas e alongadas, com diâmetros que variam entre 10 e 80 micras, coladas entre si na direção axial do tronco (PFEIL, 2003).

Figura 6 - Seções muito ampliadas do tecido celular de árvore conífera:



(a) seção transversal ao tronco, (b) seção tangencial ao tronco.

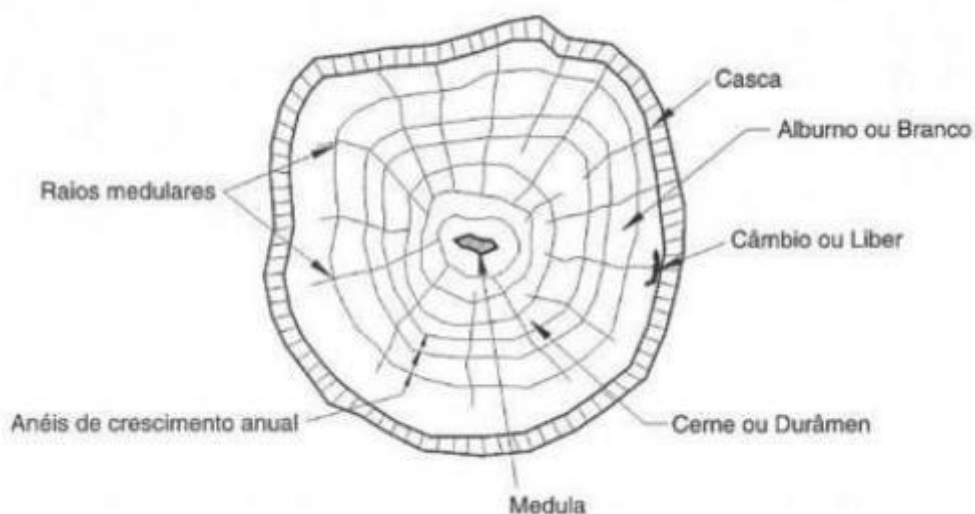
Fonte: PFEIL (2003)

Essa conformação micro celular explica a excelente relação resistência/peso encontrada na madeira. A criação de canais longitudinais entre as células, para a passagem de nutrientes por toda a árvore, faz com que após o seu corte ocorra a perda de água acumulada nestes locais. Isso acaba reduzindo significativamente o peso da peça após a sua secagem e, conseqüentemente, aumenta a resistência da peça, pois reduz efeitos de contração e inchamento. (PFEIL, 2003).

Além disso, algumas definições anatômicas relacionadas à madeira são importantes de serem estudadas. As árvores podem ser definidas como exogênicas, ou seja, crescem pela adição de camadas externas e, por isso, possuem características e propriedades que variam de acordo com o seu desenvolvimento (PFEIL, 2003).

Do ponto de vista macroscópico (**Figura 7**), podemos observar as seguintes camadas, de fora para dentro, apresentadas na seção transversal a seguir:

Figura 7 - Seção transversal macroscópica da madeira



Fonte: PFEIL (2003)

Segundo PFEIL (2003) e MENDES (2020), a proteção externa das árvores é denominada de casca, sendo formada por uma camada de tecido morto e uma fina camada interna de tecido vivo e macio. Essa camada interna, também chamada de floema ou casca interna, conduz o alimento das folhas para outras partes em desenvolvimento da árvore. Em seguida, o albarno, tecido vivo menos denso de coloração mais clara, é constituído por camadas externas de lenho e se apresenta mais permeável a líquidos e gases. Ele é responsável pela condução de seiva das raízes às folhas e, geralmente, mede de 3 a 5 centímetros.

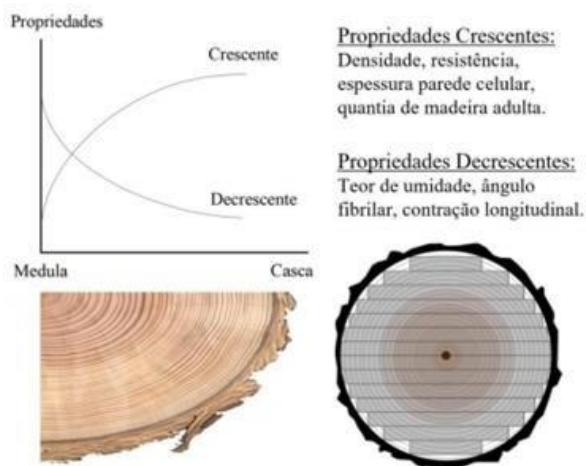
Por sua vez, o cerne é composto por células de albarno que se tornaram inativas, passando a exercer função apenas de sustentação do tronco. Com coloração mais escura, ele é caracterizado por ser uma camada mais densa e menos permeável e apresenta, além disso, maior resistência mecânica. Por último, no centro da árvore, encontramos a medula, a primeira estrutura de crescimento da madeira. Trata-se de um tecido macio, ou semiesponjoso, que possui baixa resistência mecânica (PFEIL, 2003; MENDES, 2020).

Os troncos das árvores crescem a partir da adição de anéis em volta da medula, ou seja, as camadas vão se sobrepondo às mais antigas, conforme o seu

desenvolvimento. Esses anéis são produzidos a partir da divisão de células microscópicas que estão localizadas sob a casca, região chamada de cambio. Um anel de crescimento se desenvolve em aproximadamente 1 ano, sendo constituído por um anel claro e outro mais escuro, formado de acordo com as estações do ano (PFEIL, 2003; MENDES, 2020).

Também é importante salientar que em seus primeiros anos de vida (em média 35 anos), a árvore produz o que se denomina madeira juvenil, onde suas características físicas e anatômicas são diferentes da madeira adulta. Conforme apresentado na **Figura 8**, é possível identificar que, na madeira juvenil, a maneira como são cortadas as peças apresenta grande relevância no desempenho futuro de uma estrutura (KRETSCHMANN, 2010 apud MENDES, 2020).

Figura 8 - Variação das propriedades da madeira juvenil dentro do tronco e com cortes de tábua



Fonte: KRETSCHMAN (2010) adaptado por MENDES (2020)

Desta maneira, quanto mais próximo à casca, mais se observa um aumento nas propriedades de densidade e resistência da madeira, pois concentra uma quantidade maior de madeira adulta. Já na região medular do tronco, por se tratar de madeira juvenil, existe maior contração longitudinal das fibras, que resulta em uma propensão aumentada da peça em apresentar defeitos, como, por exemplo, o

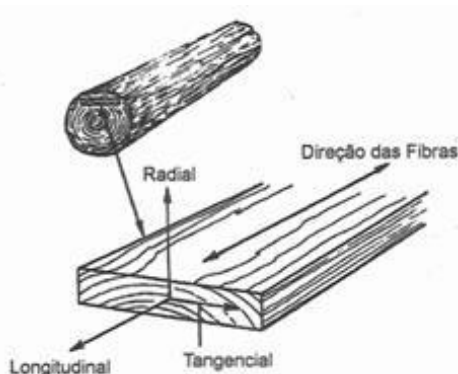
fendilhamento (abertura de pequenas fendas ou rachas).

Além disso, a qualidade e o desempenho das peças de madeira são afetados pela existência de imperfeições. A presença de nós e outros defeitos naturais afeta a qualidade e desempenho das peças de madeira. Os nós, reduzem a resistência à tração e compressão da madeira, e afetam sua flexibilidade e rigidez, tornando-a mais suscetível a deformações e quebras (DIAS,2008)

2.1.2 Propriedades Físicas

A madeira apresenta propriedades que variam de acordo com o crescimento de suas células. Ela é considerada um material anisotrópico que possui três eixos principais: longitudinal (L), radial (R), e tangencial (T), conforme pode ser observado na **Figura 9**. Além disso, pode ser caracterizada também como um material ortotrópico, pois as suas propriedades também se diferem de acordo com o sentido da fibra, sendo independentes em suas três direções (MELLO, 2007). Entretanto, as diferenças de propriedades entre os eixos tangencial e radial são bem menores quando comparados ao eixo longitudinal e, por apresentar valores muito próximos, os ensaios que caracterizam suas propriedades de resistência são realizados apenas nas direções paralela e normal às fibras (CALIL; BARALDI; STAMATO,1998).

Figura 9 - Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras



Fonte: CALIL (1998).

Além disso, segundo CALIL; BARALDI e STAMATO (1998), entre as propriedades físicas da madeira, seis delas são de conhecimento essencial

para utilizá-la como material de construção, sendo elas: umidade, densidade, retratibilidade, resistência a fogo e durabilidade natural.

2.1.2.1 Umidade

Devido à natureza higroscópica da madeira (capacidade de absorver água do ambiente), a umidade possui uma grande relevância em suas propriedades físicas e mecânicas. Suas variações podem alterar as dimensões de uma peça, ou até propiciar o desenvolvimento de defeitos como torções, empenamentos, arqueamentos, etc. Desse modo se torna indispensável controlar o seu grau de umidade. (MORESCHI, 2012). No Brasil, a NBR 7190/2022 especifica como referência, para ensaios e valores de resistência em cálculos estruturais, a utilização de 12% de umidade como unidade-padrão de referência.

2.1.2.2 Densidade

Densidade pode ser definida como o quociente entre a massa e o volume de um corpo. Na madeira, os valores de densidade variam de acordo com as condições de umidade encontradas na peça, pois a massa e o volume englobam tanto a parte sólida (madeira) quanto a parte líquida (água) e, ademais, seus vazios celulares e intracelulares (MELLO, 2007). Por isso, esse parâmetro está relacionado diretamente a suas características de resistência, em que madeiras mais densas se apresentam como sendo mais resistentes.

De acordo com a NBR 7190-1/2022, dois tipos de densidade são utilizados em estruturas de madeira. A primeira se refere à “Densidade Básica” da madeira, que é definida como a massa específica convencional, encontrada pelo quociente da massa seca, pelo volume saturado, sendo dada pela equação 1:

$$P_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}}$$

Eq. (1)

Na qual:

m_s : é a massa seca da madeira, em quilogramas;

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

Por sua vez, a “Densidade Aparente” refere-se à massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova com teor de umidade de 12%, sendo dada por meio da equação 2:

$$P_{ap} = \frac{m_{12}}{v_{12}} \text{ kg/m}^3$$

Eq. (2)

Onde:

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

V_{12} : É o volume da madeira a 12% de umidade, em metros cúbicos.

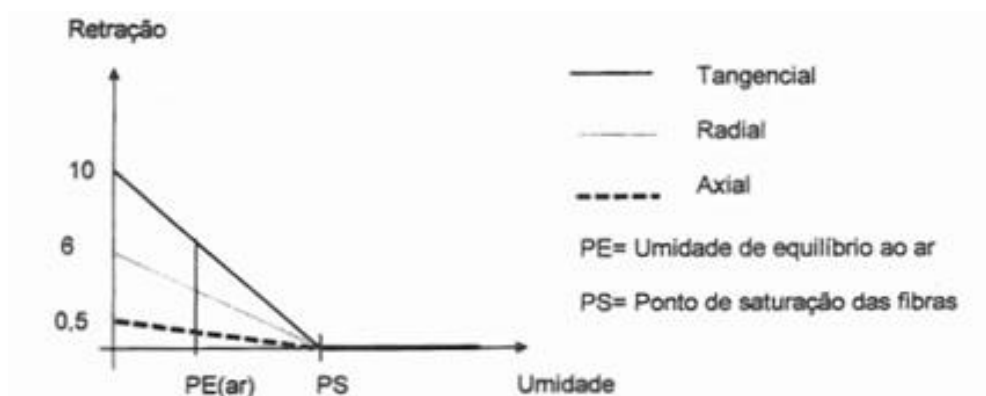
2.1.2.3 Retração

Com a variação da umidade entre 0% e 30% (ponto de saturação das fibras), as madeiras sofrem um processo denominado de inchamento (PFEIL, 2003). Define-se retratibilidade ou retração como a redução das dimensões de uma peça, quando ocorre a saída de água. Por outro lado, inchamento é a ação oposta, quando ocorre o

aumento de suas dimensões ao serem expostas à alta umidade (CALIL, *et al*,1998). As características de retração na madeira se diferenciam entre as espécies e do modo de secagem, podendo provocar defeitos oriundos da instabilidade dimensional diferenciada nos três eixos.

De acordo com a **Figura 10**, que ilustra de maneira quantitativa a retração das peças de madeira, constata-se que esse comportamento ocorre em quantidades diferentes, de acordo com suas direções.

Figura 10 - Retração da madeira



Fonte: CALIL; BARALDI; STAMATO (1998).

De acordo com CALIL; BARALDI; STAMATO, (1998), a retração na direção tangencial é a maior das três, podendo chegar em até 10%. Ela pode desenvolver problemas, como torção, nas peças. Em seguida, a direção radial apresenta 6% de retração e também pode causar patologias, como rachaduras, nas peças. Por fim, com valor de variação dimensional em 0,5%, aparece o eixo longitudinal.

Em tabuleiros de madeira serrada, a retração pode ser responsável pela perda de protensão ao longo do tempo. Como apresentado, a retração da madeira causa uma diminuição na distância entre as fibras, resultando em uma redução da força de protensão inicialmente aplicada. Além disso, a retração pode causar a formação de fendas e rachaduras nos tabuleiros de madeira serrada, comprometendo a integridade estrutural e a capacidade de suportar cargas (PAIVA,2005)

2.1.2.4 Resistência ao fogo

Ao contrário do que se pode imaginar, a estrutura de madeira - quando adequadamente projetada e construída - apresenta excelente desempenho contra a ação do fogo com resistência superior a outros materiais estruturais (PFEIL, 2003; CALIL; BARALDI; STAMATO, 1998). Devido a sua baixa condutividade de calor, as peças robustas oxidam lentamente, mantendo - em seu núcleo - propriedades mecânicas inalteradas por um longo período (PFEIL, 2003).

2.1.2.5 Durabilidade natural

A durabilidade da madeira está ligada aos ataques biológicos, em que sua resistência natural à biodeterioração depende de cada espécie e de suas respectivas características anatômicas (CALIL; BARALDI; STAMATO, 1998).

Segundo PFEIL (2003), essa vulnerabilidade da madeira depende da camada do tronco a qual foi extraída, sendo o cerne mais resistente à biodeterioração do que o alburno. Além disso, depende da espécie da madeira e das condições ambientais apresentadas a ela. Entretanto, a baixa durabilidade apresentada nesse material pode ser compensada através do uso de tratamentos preservativos que, muitas vezes, proporcionam durabilidade próxima a de espécies que naturalmente são mais resistentes (CALIL; BARALDI; STAMATO, 1998).

2.1.2.6 Propriedades Mecânicas e Elásticas

As propriedades mecânicas de um material são determinadas por sua capacidade de resistir a uma força externa aplicada, desenvolvendo deformações reversíveis, irreversíveis ou chegar à fratura. (PAZZETO, 2009 *apud* MELO, 2010). Na madeira, o comportamento a essas tensões submetidas está intimamente associado com a sua densidade, ou seja, quanto mais densa é a madeira, maior suas propriedades mecânicas (MELO, 2002 *apud* MELLO, 2007).

Segundo CARTAGENA (1984) *apud* MELO (2010), existem apenas três tipos

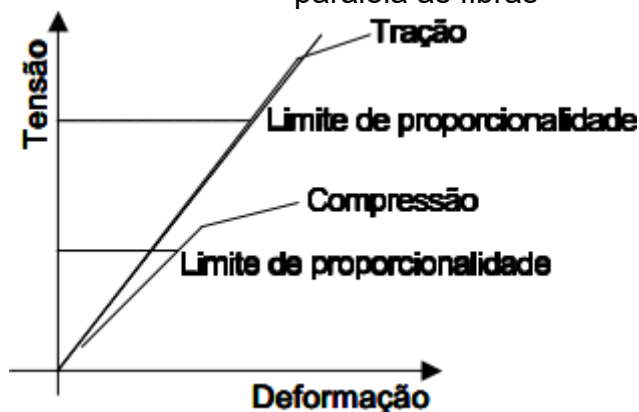
de tensões em que a madeira pode estar submetida, e, por isso, sua resistência mecânica é dada à medida que o material é comprimido, fletido ou tracionado. Como resultado, o efeito da aplicação da carga resulta em deformação elástica ou plástica, dependendo do tempo de residência da carga (MELO,2010).

2.1.2.7 Elasticidade e plasticidade da madeira

A madeira pode ser considerada um material viscoelástico, pois combina propriedades elásticas e plásticas. A elasticidade é a capacidade de um material retornar a sua forma original, sem apresentar deformação residual, após a retirada de carga aplicada. Ela é observada somente quando a ação externa exercida permanece abaixo do limite de proporcionalidade, também conhecida como fase elástica. Acima desse limite, a madeira apresenta um comportamento de plasticidade, em que ocorrerão deformações irreversíveis, que precedem a sua ruptura (MELO,2010).

A **Figura 11** apresenta o gráfico de Tensão X Deformação, no qual pode ser observado o comportamento elástico da madeira, o seu limite de proporcionalidade e o caminho para sua ruptura.

Figura 12 - Gráfico esquemático da resistência da madeira à tração e compressão paralela as fibras



Fonte: MELO (2002)

As propriedades elásticas são descritas por três constantes: o módulo de

elasticidade longitudinal (E), o módulo de elasticidade transversal (G) e o coeficiente de Poisson. Porém, por se tratar de um material ortotrópico, as propriedades de elasticidade dependem da direção de suas fibras em relação à direção aplicada da força, por isso, há uma variação entre elas (CALIL; BARALDI; STAMATO, 1998).

De acordo com a NBR7190/22, a rigidez, é medida através de três valores na fase de comportamento elástico-linear de um material. O módulo médio de elasticidade na direção paralela às fibras, encontrado no ensaio de flexão (E_m no caso de ensaios em peças estruturais) ou no ensaio de compressão paralela às fibras (E_{c0} , no caso de ensaios em corpos de prova isentos de defeitos) e o módulo médio de elasticidade E_{c90} , na direção perpendicular às fibras através do ensaio de compressão perpendicular às fibras em laboratório ou por meio da equação 3 a seguir:

Eq. (3)

$$E_{w90} = \frac{1}{20} E_{w0}$$

Onde

E_{w90} é o módulo de elasticidade normal

E_{w0} é o módulo de elasticidade longitudinal

Por fim, o módulo de elasticidade na flexão (E_m), que pode ser obtido a partir do módulo de elasticidade longitudinal, dado pelas expressões abaixo:

Para as coníferas: $E_m = 0,85E_0$ Eq. (4)

Para as dicotiledôneas: $E_m = 0,90E_0$ Eq. (5)

Por sua vez, o módulo de elasticidade transversal (G) é apresentado pela norma com o valor efetivo de:

$$G_{ef} = E_{c0.ef0}/20 \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

G_{ef} é o módulo de elasticidade transversal com o valor efetivo;

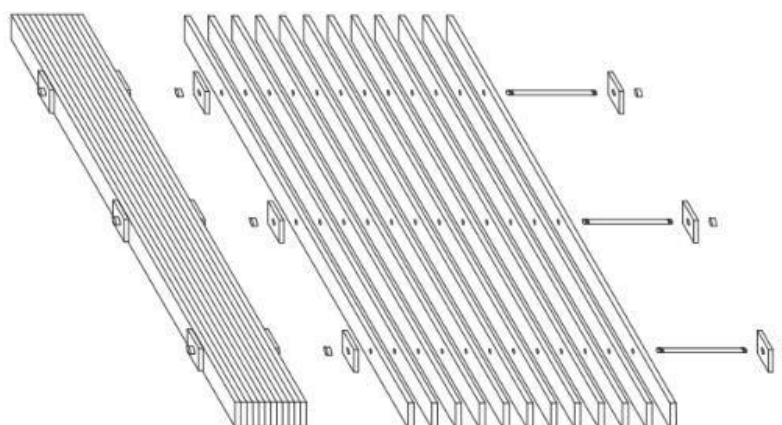
$E_{c0.ef}$ é o módulo de elasticidade longitudinal.

Entretanto, valores referentes ao coeficiente de Poisson, o qual mede as deformações de um material em direções perpendiculares à direção da força aplicada, não são especificados para a madeira na NBR7190/1997 e NBR71/2022.

2.2 ELEMENTO HORIZONTAL LAMINADO PROTENDIDO TRANSVERSALMENTE

Conforme ilustrado na **Figura 12**, a tecnologia de laminação horizontal protendida consiste em diversas peças de madeira serrada, dispostas lado a lado e perfuradas ao longo do seu comprimento, protendidas transversalmente por meio de barras de aço, de alta resistência, juntamente com as placas de ancoragem, fazendo com que a força de compressão aplicada, provoque o atrito lateral entre as lâminas solidarizando o conjunto.

Figura 13 - Tabuleiro laminado protendido



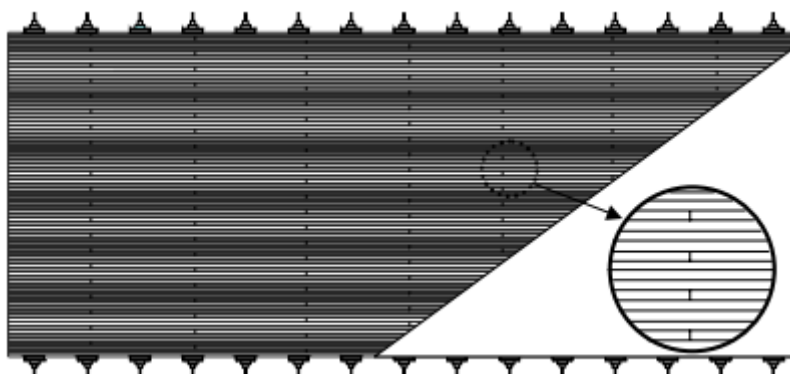
Fonte: FLEMING (2020)

Devido às diferentes características mecânicas da madeira nas direções longitudinal e transversal, a madeira laminada protendida transversalmente pode ser caracterizada como uma placa ortotrópica (propriedades iguais no mesmo eixo, mas diferentes entre os eixos). Suas propriedades são influenciadas pela espécie da madeira, teor de umidade, geometria da placa, frequência de juntas de topo (**Figura 14**) e nível de protensão (EKHOLM *et. al*, 2014, GÓES, 2005).

Quando o vão a ser vencido de uma estrutura supera o limite de comprimento das peças de madeira, pode-se recorrer à utilização de juntas de topo (FONTE, CALIL, 2017) Porém é importante destacar que, o efeito das juntas de topo influencia

diretamente na distribuição da carga na estrutura, dependendo diretamente de sua frequência.

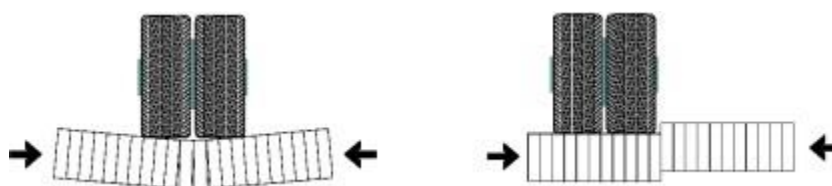
Figura 14 - Juntas de topo, a cada quatro vigas.



Fonte: CALIL; BARALDI; STAMATO (1998).

A **Figura 14** representa o comportamento estrutural do elemento quando solicitado a uma carga vertical. A flexão transversal gera afastamento das tábuas na parte inferior da placa, enquanto o cisalhamento produz escorregamento vertical entre elas (GÓES, 2005).

Figura 15 - Comportamento mecânico do tabuleiro laminado protendido



Fonte: CREWS (2005) apud GOES (2005)

Para que esses comportamentos sejam evitados, a aplicação de altos valores de protensão devem ser realizados nesse elemento estrutural, assim como reprotensões periódicas (MASSARO; MALO 2020). Assunto esse, que será abordado em maiores detalhes.

2.2.1 Breve contexto histórico sobre tabuleiros laminados protendidos transversalmente

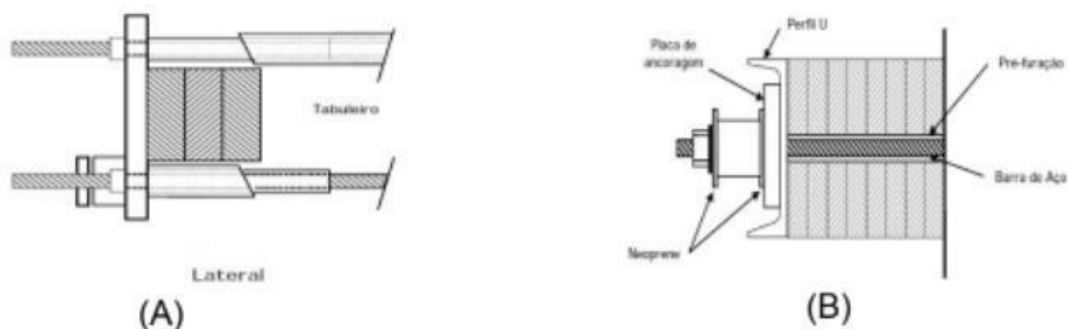
Ao contrário de outros sistemas construtivos em madeira que emergiram da indústria, a madeira laminada protendida transversalmente surgiu pela necessidade em reparar antigas pontes laminadas pregadas. A variação de umidade encontrada no ambiente proporcionava a perda de continuidade transversal devido à oxidação dos pregos e às mudanças de volume das peças serradas (FLEMING, 2016; CEFERINO, 2013).

Essa tecnologia foi utilizada pela primeira vez na ponte *Hebert Creek*, em 1976, em Ontário, Canadá, onde se constatou que a aplicação do esforço de compressão transversal, através das barras de aço protendidas, não só restaurou e evitou que ocorresse separação das vigas, como também aumentou a distribuição de cargas entre elas. (CROCETTI; EKHOLM; KLIGER, 2016).

Com o sucesso do sistema em restaurar diversas pontes laminadas pregadas, durante os anos seguintes, o Ministério de Transporte de Ontário coordenou diversas pesquisas para que essa nova tecnologia pudesse ser utilizada na construção de novas pontes. Até que em 1981, sobre o rio West, na cidade de Espanola, Ontário, a primeira ponte protendida transversalmente foi construída, denominada Fox Lake Road (CEFERINO, 2013).

Diferentemente da ponte *Hebert Creek*, que teve sua seção transversal protendida por duas barras de aço de alta resistência ancoradas a uma placa de aço, a nova ponte Fox Lake Road teve algumas mudanças. Para sua construção, além de suas vigas serem pré-furadas internamente para a passagem das barras, também foram utilizadas seções “U” nas extremidades para aumentar a rigidez das bordas e evitar esmagamentos (**Figura 16**) (CEFERINO, 2013; OKIMOTO, 1997).

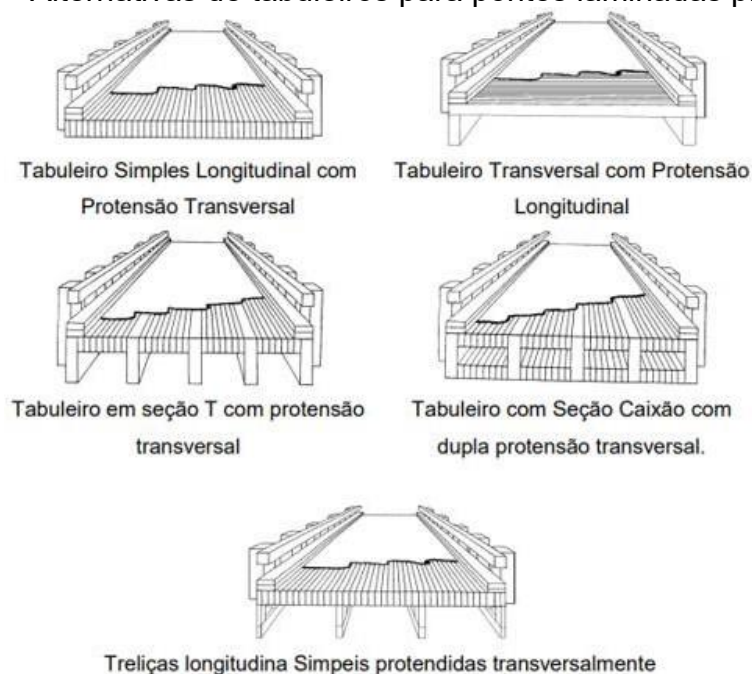
Figura 16 - (A) Detalhe de ancoragem da ponte Hebert Creek, (B) Detalhe de ancoragem Fox Lake Roda.



Fonte: CEFERINO (2013)

Nas décadas seguintes, esse sistema passou a ser implementado na Europa, Austrália, Japão e outros países, assim como pesquisas experimentais e teóricas mais abrangentes (MASSAR; MALO, 2020; FORTINO *et al.* 2021). Devido à flexibilidade encontrada na tecnologia, obteve-se a possibilidade do desenvolvimento de variações a partir do tabuleiro simples longitudinal (**Figura 17**), as quais possibilitaram o aumento da rigidez e o alcance de maiores vãos (OKIMOTO, 1997).

Figura 17 - Alternativas de tabuleiros para pontes laminadas protendidas



Fonte: OKIMOTO (1997).

Ademais, os resultados desses estudos indicaram excelente eficácia estrutural e viabilidade econômica, além de expectativa de vida útil de projeto, estimado em mais de 50 anos, quanto recebida manutenção periódica (CEFERINO, 2013).

Já no Brasil, a Escola de Engenharia de São Carlos é referência em estudos sobre pontes laminadas protendidas. Além de ser pioneira nas pesquisas no país, em 2004, construiu a primeira ponte protendida da América Latina e criou métodos de análise e de cálculos para pontes protendidas, utilizando dados dos materiais nacionais, sendo apresentados a seguir. (ACOSTA, 2015)

2.2.2 Trabalhos realizados na Escola de Engenharia de São Carlos.

A Escola de Engenharia de São Carlos, ao longo dos anos, desenvolveu diversas pesquisas em seu Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), que contribuíram para o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias para pontes laminadas protendidas.

O primeiro estudo teórico e experimental foi realizado por PRATA (1995) em sua tese “Pontes protendidas de madeira”. Nesta pesquisa, foram apresentados métodos de análise e cálculos para a utilização em pontes de madeira protendidas, como o “Método Ontario Highway Bridge Design Code” (OHBDC), por ser o mais próximo do carregamento real definido pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Além disso, determinou parâmetros elásticos para a espécie *Eucalyptus Citriodora*, submetidas à protensão, fornecendo diretrizes para futuros projetos.

OKIMOTO (1997) - em sua dissertação “Pontes protendidas de madeira: Parâmetros de projeto” - retorna ao assunto e estuda o comportamento de pontes de madeira protendidas para pequenos vãos, comparando a utilização do *Eucalypto Citriodora* e *Pinus Elliottii*. Neste estudo, foram determinados os parâmetros elásticos dos tabuleiros e desenvolvidas diretrizes para orientar o dimensionamento dessas estruturas. O uso de “juntas de topo” na rigidez longitudinal também foi analisado e não apresentou prejuízos de resistência e rigidez da estrutura.

Como continuidade, em sua tese “Análise da perda de protensão em pontes protendidas de madeira”, OKIMOTO (2001) complementa o estudo da perda de protensão ao longo do tempo em tabuleiros protendidos de madeira. Foi verificado que as variações de diâmetro das barras não influenciaram nos resultados, sendo mais importante a carga de protensão aplicada. O estudo confirmou a importância de protensões periódicas para manter níveis mínimos de projeto e também apresentou, como alternativa ao uso da Dywidag, utilização de outros tipos de aços que não causaram diminuição da qualidade do sistema de protensão. Além disso, com os resultados encontrados na pesquisa, incorporados ao software Ortotropic Timber Bridges (OTB), possibilitou a automatização dos cálculos para análise de placas ortotrópicas para pontes.

ALVES (2002) – percebendo a necessidade de se construírem pontes que alcançassem maiores vãos, em sua dissertação “Análise de pontes de madeira protendida transversalmente formadas por vigas-T” - estuda uma variação da seção transversal do sistema estrutural de ponte de madeira com tabuleiro protendido, formada por vigas-T. Os resultados apresentados indicaram que - utilizando madeira de classe C30 ou C40, ou variando a altura do tabuleiro de 15cm até 25cm - não houve influência significativa de diferença na altura da nervura (também denominada de viga). Entre os valores calculados pelo método WVU (Método desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da West Virginia University), que prevê as tensões e os deslocamentos das pontes formadas por vigas T de madeira protendida e através do modelo teórico. Avaliado experimentalmente em modelo reduzido, obteve-se boa concordância entre os valores encontrados.

PLETZ (2003), constrói a primeira passarela estaiada, usando madeira laminada protendida, em tamanho real no Brasil, comprovando a sua viabilidade técnica e econômica. A perda de curvatura demonstrou ser causada pela deformação lenta das lâminas, assim como a rigidez a flexão das barras de engastamento das placas nos elementos metálicos e a facilidade de encurvamento das lâminas, porém de modo geral, apresentou-se com perdas muito menores do que as experimentadas pelas placas componentes isoladas. Também foi possível avaliar as vibrações induzidas pelos pedestres e realizar a calibragem do modelo numérico.

CHEUNG (2003), em sua dissertação “Tabuleiro ortotrópico treliçado

protendido transversalmente para aplicação em pontes de madeira”, demonstrou que, ao utilizar o modelo com arranjo em forma de treliças e conectores metálicos nas ligações com os banzos (**Figura 18**) aumentou-se a rigidez do sistema e diminuiu-se o consumo de madeira. Além disso, melhorou-se o desempenho do revestimento do tabuleiro, eliminando as fissuras apresentadas nos tabuleiros protendidos e laminado colado. Outrossim, foi constatado que a bitola dos conectores utilizados nas ligações influencia na resistência final do arrancamento pois, segundo o autor, surgem efeitos de grupo e alinhamento dos dentes que reduzem a resistência.

Figura 18 - Tabuleiro ortotrópico treliçado protendido transversalmente



Fonte: CHEUNG (2003)

FONTE (2004), em sua dissertação “Pontes protendidas de Eucalipto Citriodora”, projetou e avaliou, por meio de provas de carga, o desempenho de uma ponte protendida de seção transversal retangular maciça e a influência de seus guardas-rodas. Essa foi a primeira ponte protendida de madeira na América do Sul que utilizou em sua construção materiais, ferramentas e madeiras nacionais de espécies de reflorestamento. Os resultados de sua pesquisa demonstraram que o sistema protendido de eucalipto é uma alternativa segura, eficaz e de baixo custo para o país, quando comparadas a outras construídas com a mesma tecnologia no exterior.

GÓES (2005), em sua tese “Estudos de pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido”, avaliou o comportamento estrutural de duas pontes construídas no Campus II da USP São Carlos, frente a carregamentos concentrados.

Esse sistema de ponte de madeira com tabuleiro multicelular protendido consiste em placas de madeira superiores e inferiores protendidas ligadas a alma (Figura18). Como resultado, indicou-se a viabilidade da utilização desse sistema para pontes com vãos de 12m a 25m, tendo como destaque a sua elevada rigidez à flexão longitudinal e à torção, proporcionado pela geometria da seção transversal. Além disso, resultou em uma maior economia de madeira, quando comparadas à seção transversal de pontes simples protendidas transversalmente.

Figura 19 - tabuleiro multicelular de madeira protendida



Fonte: GÓES (2005)

CEFERRINO (2013), estudou o desempenho de um tabuleiro com o uso de cordoalhas engraxadas como sistema de protensão, analisando por um longo período as influências de temperatura e da umidade. O comportamento de protensão do tabuleiro protendido com cordoalhas demonstrou uma perda de protensão inferior ao sistema de Dywidag, tornando uma opção viável no Brasil, com custo menor e proteção superior às barras de aço. Essa foi a primeira pesquisa desenvolvida com cordoalhas engraxadas.

ACOSTA (2015), determinou, a partir de um modelo construído em escala reduzida, as constantes elásticas e as perdas de protensão do tabuleiro utilizando cordoalhas engraxadas. Os valores encontrados apresentam valores superiores aos esperados pela bibliográfica para tabuleiros protendidos com barras Dywidag no modelo de elasticidade na direção transversal e módulo de elasticidade transversal. Entretanto, segundo o autor, como trata-se de um sistema novo, recomenda-se que mais estudos e ensaios sejam realizados, uma vez que apenas um protótipo não pode responder com confiabilidade o comportamento deste tipo de estrutura.

2.2.3 Madeira para placas laminadas protendidas transversalmente

A madeira utilizada nessa tecnologia é a de reflorestamento de Pinus ou Eucalipto, serrada em dimensões retangulares comerciais, que medem geralmente 5cm de largura, por uma altura de até 40cm (PLETZ,2003). Segundo FONTE (2004), em tabuleiros de madeira protendida simples para pontes, com vãos de até 12 metros, a estimativa da altura inicial da peça é determinada em função do vão e do carregamento. Utiliza-se a **Tabela 2** - Estimativa de altura do tabuleiro como referência:

Tabela 2 - Estimativa de altura do tabuleiro

Vão da ponte (m)	Espessura do tabuleiro (cm)	
	Coníferas	Dicotiledôneas
menor que 3 metros	25 cm	20 cm
vão entre 3 e 6 metros	30 cm	25 cm
vão entre 6 e 9 metros	35 cm	30 cm
maior que 9 metros	40 cm	35 cm

Fonte: FONTE (2004).

2.2.4 Sistema de protensão.

Para proporcionar comportamento estrutural de placa ortotrópica (propriedades iguais no mesmo eixo, mas diferentes entres os eixos), com resistência a cargas aplicadas, dois sistemas de protensão transversal são comumente utilizados na construção de tabuleiros de pontes protendidas transversalmente: Barras Dywidag e cordoalhas engraxadas.

Conforme apresentado na **Figura 20**, o sistema Dywidag é composto por barras de aço de alta resistência, geralmente de 16mm, ancoradas na extremidade da estrutura através de uma placa de aço quadrada que transfere e distribui a protensão adquirida pela porca de ancoragem. De acordo com a fabricante DYWIDAG, a protensão é aplicada no sistema através de um Macaco-Bomba hidráulico, que traciona a barra com cargas sucessivas, até atingir a carga necessária. É importante

mencionar que a alta performance do sistema não permite soldagem de nenhum componente, especialmente das barras, que, se necessário, devem ser utilizadas luvas de emenda para o alcançado comprimento desejado.

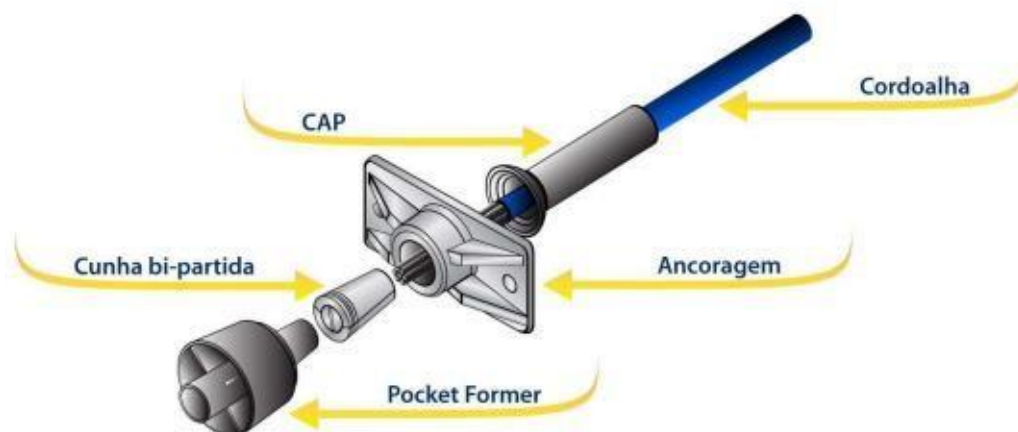
Figura 20 - Sistemas de Protensão com Barras DYWIDAG



Fonte: Dywidag. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/pbastos/Protendido/DYWIDAG-Brasil.pdf>

A utilização de cordoalhas engraxadas vem sendo objeto de estudo, nos últimos anos, por ser um novo sistema de protensão para a utilização em tabuleiros de madeira laminada protendida. Elas são constituídas, geralmente, por sete fios de aço carbono, sendo seis deles, com o mesmo diâmetro, encordoados a um fio central pelo menos 2% maior (Ver **Figura 21**). Uma camada de graxa é aplicada entre os fios para evitar a corrosão, sendo revestidos por uma capa de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) (CEFÉRINO, 2013).

Figura 21 - Sistema de protensão utilizando Cordoalhas Engraxadas



Fonte: Coplas. Disponível em: <https://www.coplas.com.br/wp-content/uploads/2020/11/Pisos-Industriais-Protendidos-Acessorios-plasticos-para-nichos-de-protensao-COPLAS.pdf>. Acesso em 05 de junho de 2022

Seu sistema de ancoragem é constituído por uma placa, também de aço carbono, para fixação de cordoalhas de 12,7mm ou 15,22 mm, com travamento realizado por meio de cunhas metálicas bipartidas. Segundo estudos de ACOSTA (2016) e CEFERINO (2013), esse sistema apresenta grande disponibilidade no Brasil e, economicamente, torna-se mais viável que o Dywidag. (ACOSTA, 2016; CEFERINO, 2013).

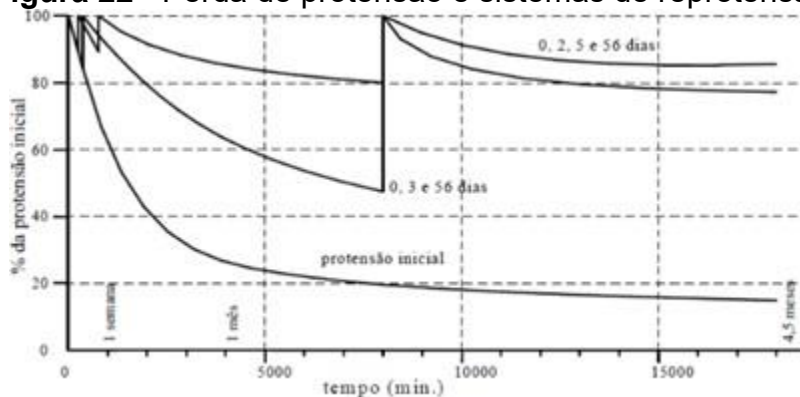
2.2.5 Perdas de protensão

Segundo MASSARO (2020) e FLEMING e RAMAGE(2020), a protensão aplicada não é constante durante a vida útil da madeira laminada protendida transversalmente. Quando não considerada adequadamente, pode reduzir significativamente as forças de atrito, resultando em um grave problema para a integridade do sistema.

Em 1988, OLIVA, RITTER e DIMAKIS, já citavam a fluência da madeira e o alívio das tensões no aço como as principais causas da perda de protensão nos

tabuleiros de pontes protendidas transversalmente. TAYLOR e CSAGOLY (1979) apud RITTER (1990), ao estudar o comportamento do sistema, apresentam um método efetivo para controlar a perda de protensão e que até hoje é utilizado. Para controlar esse problema, é sugerido que seja aplicado inicialmente uma protensão **de 2,5 vezes** o valor indicado no projeto e, no mínimo, **mais 2 reprotensões após a montagem (2, 5 e 56 dias)**, em que a perda final não ultrapassará 10%. Caso seja protendido apenas uma vez, os índices de perdas de protensão no tabuleiro podem chegar em até 80%. A **Figura 22** mostra o comportamento do tabuleiro de acordo com as sequências de protensões aplicadas.

Figura 22 - Perda de protensão e sistemas de reprotensão



Fonte: TAYLOR CSAGOLY (1979) apud RITTER (1992)

2.2.6 Fluência na Madeira

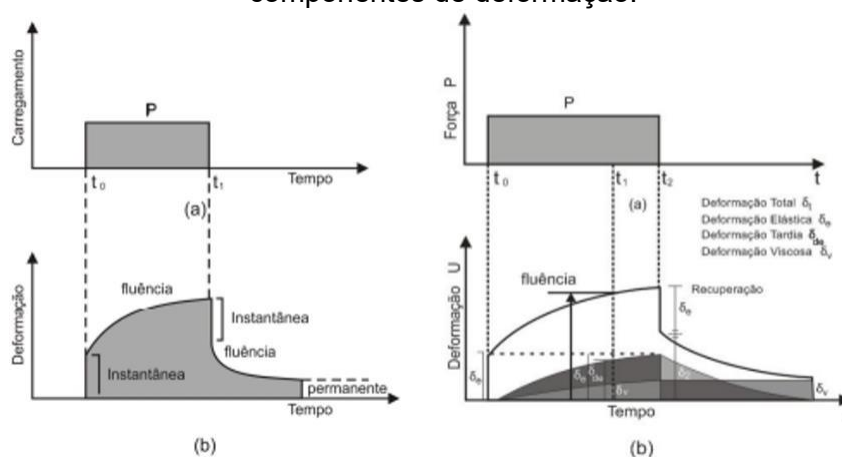
Sendo a união das lâminas de madeira a base do funcionamento da tecnologia da madeira protendida transversalmente, OKIMOTO (2002) expõe a necessidade de se estudar a deformação lenta em solicitações normais às fibras de madeira. Como já mencionado, trata-se de um material viscoelástico, que apresenta, além da deformação elástica, um acréscimo de deformação com o passar do tempo, mesmo que a carga aplicada seja mantida constantemente (PFEIL, 2003). Esse comportamento é conhecido como fluência. Ela ocorre mesmo em tensões muito baixas, desde que haja persistência do carregamento, e está intimamente influenciada pelas propriedades da madeira, umidade relativa do ar e temperatura do ambiente. (LAUFENBERG, T.L; PALKA, L.C; MCNATT, J. D, 1987 apud MELO e MENEZZI,

2010).

A **Figura 23** ilustra graficamente o fenômeno da fluência. Segundo MELO (2010), quando uma carga é aplicada na madeira, ela sofre uma deformação instantânea que se apresenta proporcional à força aplicada. Essa deformação vai aumentando gradativamente conforme a tensão é mantida, porém, quando ocorre a retirada da carga, a deformação instantânea rapidamente é restaurada, em velocidade semelhante ao início do processo.

Por sua vez, a deformação ocasionada pela fluência vai sendo recuperada lentamente. Devido às características viscoelásticas da madeira, essa deformação não é totalmente recuperada, ocasionando uma deformação permanente.

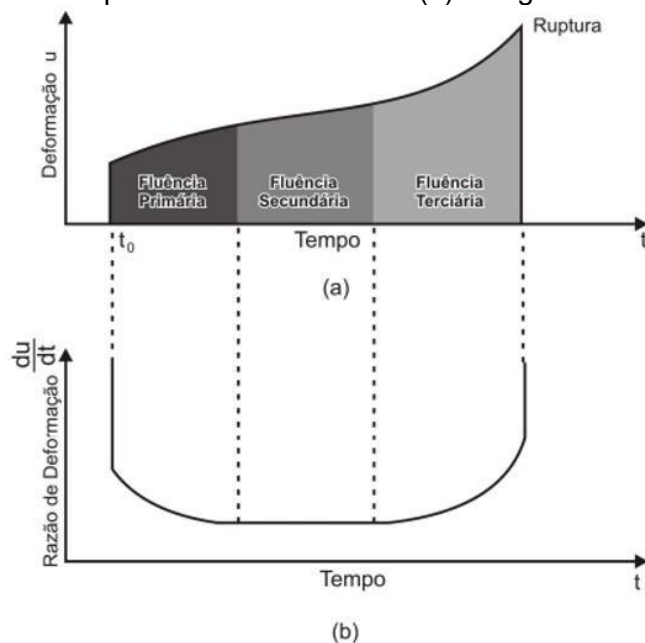
Figura 23 - Relações entre carga x tempo (a) e deformação x tempo (b), A direita, os componentes de deformação.



Fonte: BODIG, JAYNE (1993) adaptado por MELO e MENEZZI (2010).

MELO e MENEZZI (2010) ainda descrevem que o fenômeno da fluência na madeira pode ser dividido em três etapas: 1) Fluência primária, em que há rápida e elevada deformação quando a carga é aplicada; 2) fluência secundária, quando ocorre a relação deformação x tempo e apresenta-se praticamente constante; 3) fluência terciária, quando a relação deformação x tempo volta a aumentar e ao permanecer, pode levar à ruptura da peça. Essas etapas podem ser observadas na **Figura 24**.

Figura 24 - Comportamento da fluência. (a) estágio da fluência e (b)



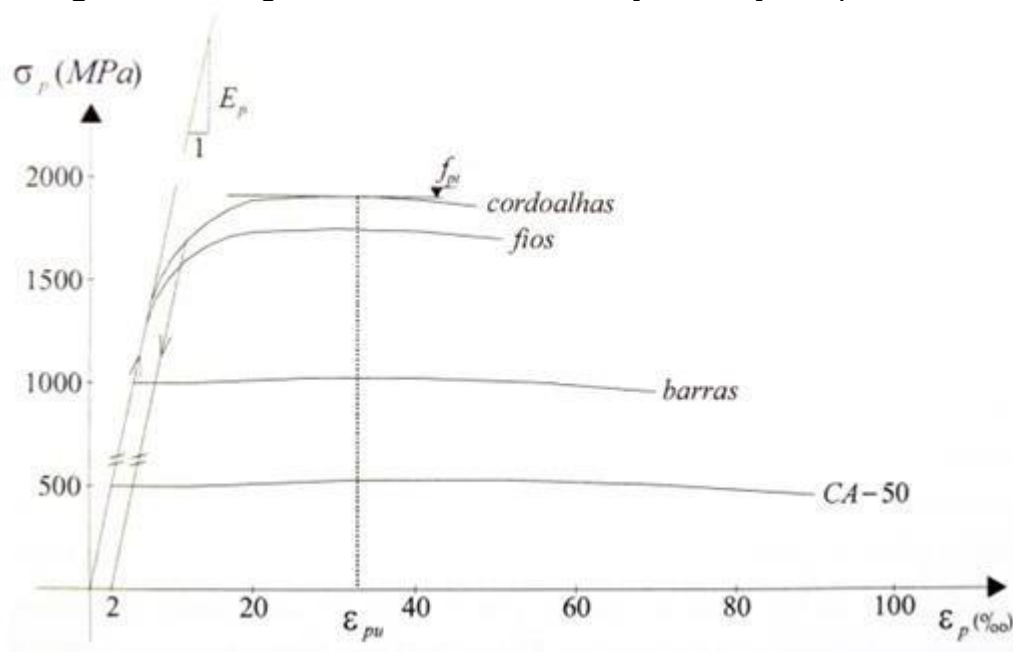
Fonte: BODIG, JAYNE (1993) adaptado por MELO (2010).

2.2.7 Relaxamento do aço de protensão

A relaxação pode ser definida como a redução da tensão necessária para a manutenção de um estado constante de deformação (BODIG; JAYNE, 1993 *apud* MELO *et al* 2010). Como apresentado anteriormente, para a aplicação de protensão em estruturas de madeira, os aços mais utilizados podem ser classificados como cordoalhas, fios, ou barras, sendo as mais utilizadas, especificamente, as barras DYWIDAG (ACOSTA,2015).

BUCHAIM (2007) *apud* ACOSTA (2015) indica, na **Figura 25**, o diagrama de tensão-deformação destes materiais, em que é apresentado um trecho inicial linear e o arco tangente dessa reta como sendo o módulo de elasticidade. A seguir, na curva acentuada, o aço passa da fase elástica para a plástica e, por último, mantém um trecho linear em que predominam as deformações plásticas do material.

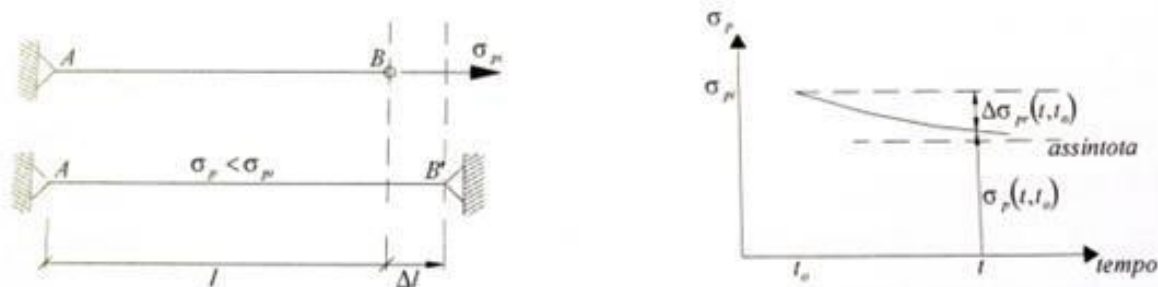
Figura 25 - Diagrama de tensão-deformação do aço de protensão



Fonte: BUCHAIM (2007) apud ACOSTA (2015)

BUCHAIM (2007) apud ACOSTA (2015) ainda demonstra que a relaxação do aço acontece quando a barra é exposta a uma tensão inicial de tração em T_0 e permanece neste estado. Posteriormente, é acondicionada a uma deformação constante até um tempo $T > t_0$ e, com o tempo, ocorre uma redução da tensão aplicada inicialmente, conforme **Figura 26**, dada esta variação por $\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)$

Figura 26 - Relaxação do aço de protensão e gráfico de relaxação ao



Fonte: BUCHAIM (2007) apud ACOSTA (2015)

2.3 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise da revisão bibliográfica permitiu conhecer as propriedades básicas da madeira para entender como elas podem influenciar o desempenho e a resistência de uma estrutura.

Permitiu conhecer como os defeitos da madeira influenciam suas propriedades mecânicas assim como a sua densidade, característica física intimamente ligada às propriedades mecânicas, sobretudo a rigidez.

Ademais, forneceu os fundamentos da tecnologia de madeira protendida transversalmente, até o momento utilizada em pontes e passarelas, oferecendo subsídios para o dimensionamento e construção do experimento da pesquisa, de acordo com as normativas relativas à flexo-compressão. Essa técnica de construção oferece uma alternativa simples e viável, principalmente em locais como o Brasil, em que a indústria de produtos engenheirados ainda não é consolidada, mas apresenta grande disponibilidade de material, justificando o potencial para a pesquisa de um elemento de laje, em termos de construção simples e desempenho estrutural.

Entretanto, como em qualquer estrutura protendida, as perdas nas forças de protensão também precisam ser cuidadosamente consideradas para garantir confiabilidade e desempenho estrutural a longo prazo. Para isso, foram utilizados os estudos realizados no Brasil pelo LaMEM como norteador da pesquisa que determinaram os conceitos, os parâmetros elásticos, os níveis de protensão a serem utilizados e os métodos de avaliação do comportamento estrutural dessa tecnologia. Além disso, percebeu-se a importância de realização dos ensaios físicos em laboratórios, para caracterizar o comportamento real da estrutura e, assim, calibrar a modelagem para futuros trabalhos.

A retração talvez seja o fator mais importante na perda de protensão. O relaxamento dos elementos de protensão pode ser potencializado pela variação de umidade de componentes expostos a intempéries como por exemplo, pontes. Entretanto, entende-se que no caso de lajes internas, o intemperismo é muito menor, já que não estaria exposta diretamente a fatores degradantes.

Também é importante destacar que, a ideia em produzir um componente de laje de madeira serrada utilizando a técnica de protensão transversal deslocando suas laminadas verticalmente para proporcionar um aumento em seu momento de inércia, não foi encontrada na literatura, configurando-se como uma inovação. Trata-se de um experimento que busca atender a demanda da construção em madeira, que necessita de melhores condições de isolamento, além de buscar uma solução mais inovadora para lajes em madeira.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo é dedicado à apresentação dos materiais e metodologia aplicada para a realização da parte experimental do trabalho.

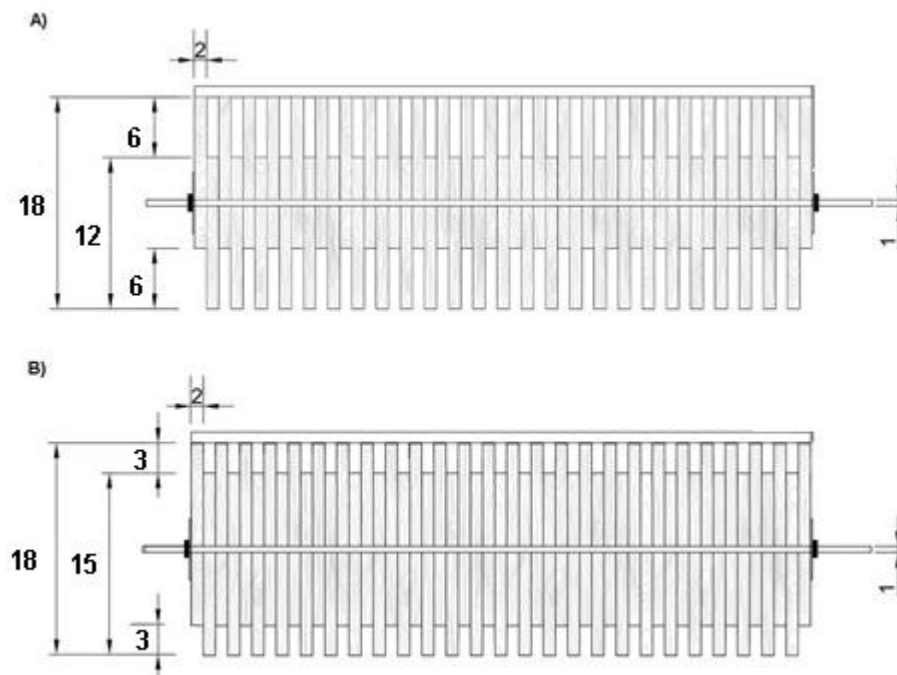
Trata de uma pesquisa exploratória e experimental, pois a utilização dessa tecnologia como um elemento de laje para a construção civil é um tema pouco conhecido e estudado. Nesse processo, houve a necessidade de criar uma base de conhecimentos técnicos, adquiridos através de pesquisas realizadas em pontes de madeira protendida transversalmente, em conjunto a outras fontes bibliográficas e normas técnicas, a fim de atingir os objetivos descritos no trabalho.

Como dito anteriormente esta pesquisa tem como objetivo a viabilização de um componente de laje para construção civil, utilizando a tecnologia de madeira laminada protendida transversalmente, buscando a redução do consumo de madeira e, conseqüentemente, o seu peso e custo. Também se busca a simplificação do material de protensão, para ser o mais econômico possível, com disponibilidade e acessibilidade comercial para o usuário e construtor.

Dessa maneira, da mesma forma com a qual são construídas as pontes, foram utilizadas tábuas de madeira de reflorestamento da espécie *Pinus spp.*, utilizada na construção civil em sua forma bruta como por exemplo, na confecção de formas para concreto com protensão transversal. Porém, com arranjo geométrico diferente do tradicionalmente encontrado, foi utilizada como estratégia, tábuas de menores dimensões, potencializando o seu desempenho através do deslocamento vertical intercalado dos componentes da seção transversal, buscando resistência semelhante aos tabuleiros com a mesma seção transversal.

Na figura abaixo, é possível observar algumas possibilidades de arranjos experimentais, com seção transversal de 18,0 cm, em que são utilizadas tábuas com bitolas comerciais de 12,0x2,0cm com deslocamento de 6cm (A) e 15,0 cm com deslocamento de 3 cm. (B).

Figura 27 - Arranjos experimentais com seção 18 cm



Fonte: AUTORA (2023)

3.1 HIPÓTESE DA PESQUISA

Em componentes com seção retangular, como é também o caso das lajes, o momento de inércia em flexão é determinado de acordo com a equação:

$$I: \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Eq. (7)

Onde:

I é Inércia

b é base

h é altura

A expressão sugere que o aumento do momento de inércia é cúbico proporcionalmente à altura da peça. Portanto, aumentar a altura de uma peça estrutural incorre em deslocamentos diminuídos na mesma proporção cúbica.

Dessa forma, esta pesquisa adota como hipótese que, para adaptar a tecnologia de madeira protendida para sua aplicação como laje em edificações e sobretudo, reduzir o custo e o seu peso, utilizem-se elementos laminares de menores dimensões, potencializando o seu desempenho através do deslocamento vertical intercalado dos componentes da seção transversal. Supõe-se que essa estratégia proporcionará resistência semelhante a lajes com a mesma seção transversal.

3.2 MÉTODOS

A parte experimental dessa dissertação foi realizada em 4 etapas. A primeira consistiu na caracterização estrutural das peças que seriam utilizadas para a construção dos experimentos, realizada de acordo com NBR 7190/22, em conjunto com “Manual de classificação visual de peças estruturais de madeira tipo Pinus” elaborado por MOURA e PLETZ (2011).

A etapa 2 consistiu na seleção e divisão das tabuas em 6 grupos, como forma de minimizar o desvio padrão encontrado no lote e obter corpos de prova com propriedades similares.

Em seguida, na etapa 3, é realizada a construção dos corpos de prova, composta pelo processo de furação das tabuas, montagem e aplicação de protensão.

Por fim, na etapa 4, são efetuados os ensaios de mecânicos dos corpos de prova e, analisados os respectivos resultados.

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Madeira utilizada

O lote da pesquisa contou com 120 tábuas do gênero *Pinus spp*, adquiridas localmente na cidade de Londrina-PR, no mês de abril de 2022. Por serem consideradas madeiras de baixo valor agregado, utilizada na maioria das vezes para cimbramento de estruturas de concreto, não possuíam processamento de marcenaria. Além disso, encontravam-se expostas à chuva quando compradas, chegando ao laboratório com umidade entre 40% e 50% (**Figura 28**).

Figura 28 - Lote de madeira *Pinus spp*



Fonte: AUTORA (2023)

Em um primeiro momento, as peças foram empilhadas com a ajuda de espaçadores de madeira (**Figura 29**), entretanto até o mês de junho ainda apresentavam umidade elevada, sendo necessário utilizar ventiladores para acelerar o processo de secagem. Ademais, até o mês de outubro, quando foram realizados os testes de flexão, alguma delas ainda apresentavam umidade maior que 12%, chegando até 17%.

Figura 29 - Armazenamento do lote



Fonte: AUTORA (2023)

De maneira geral, as peças apresentam em média três metros de comprimento, com seção transversal nominal de dois centímetros por vinte e cinco centímetros. Devido ao alto índice de defeitos encontrados houve a necessidade de sua classificação. Para isso, foram conduzidos dois ensaios para a determinação do módulo de elasticidade do lote.

1. Classificação Visual
2. Ensaio de flexão estática

3.3.2 Caracterização visual das peças

A caracterização visual das peças neste trabalho, tem como objetivo descartar as peças com graves defeitos como fissuras e rachaduras, e posteriormente, em conjunto com os resultados obtidos nos ensaios de flexão dos corpos de provas, auxiliar na compreensão de como defeitos das peças podem influenciar o comportamento mecânico dos componentes.

De acordo com a NBR 7190-2/2022, a classificação visual das peças de madeira serrada é realizada a partir da inspeção visual de suas duas faces e de suas bordas com relação à presença de defeitos, sendo considerados: presença de medula, nós, inclinação excessiva das fibras, fissuras passantes e não passantes, distorções dimensionais (encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento, esmoado), ataques biológicos, danos mecânicos ou bolsas de resina. Como resultado, considerando os defeitos e suas severidades encontradas, atribui-se uma classe visual à peça serrada de madeira de florestas plantadas, sendo classificadas em Classe 1, Classe 2 ou Classe 3, conforme apresentado a seguir:

Figura 30 - Classificação visual das classes para Pinus spp

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

Fonte: NBR 7190-2/2022 - Anexo A

Em conjunto com a norma atualizada, esse trabalho também utilizou como norteador da classificação visual do lote, o manual de classificação visual desenvolvido por MOURA e PLETZ (2011), por se tratar de um material didático baseado da Norma NBR 7190/97. Nele, é apresentado através de imagens, a natureza e a localização dos nós, assim como o desvio de grã, empenamentos e fendas, conferindo também um nível de classificação de qualidade para as peças. Esta classificação visual, distingue as peças em quatro níveis: Classe EE, Classe nº1,

Classe nº2, Classe nº3, sendo de acordo com o MOURA e PLETZ (2011)

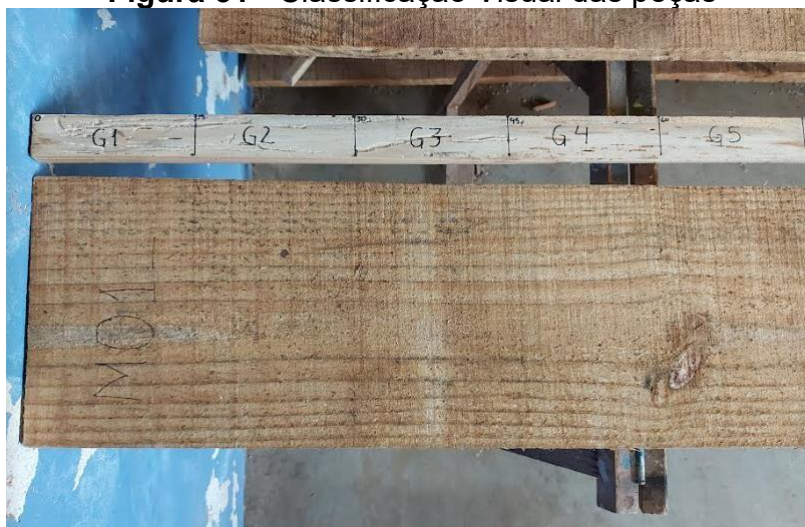
A Classe Estrutural Especial (EE) recomendada para aplicações nas quais requerem valores elevados para as propriedades de resistência e rigidez bem como boa aparência; A Classe nº1 também é recomendada para edificações nas quais requerem valores elevados para as propriedades de resistência e rigidez bem como boa aparência; Classe nº2 é recomendada para aplicações gerais em edificações nas quais se requerem valores moderados para as propriedades de resistência e rigidez; Classe nº3; recomendada para aplicações gerais em edificações nas quais se permitem valores baixos para as propriedades de resistência e rigidez, sendo que a aparência não é um fator importante.

3.3.2.1 Critérios de classificação

Como as peças passaram pelo processo de protensão, sendo o objetivo do trabalho utilizar madeira de baixa qualidade, defeitos como encurvamento, arqueamento, encanoamento, torção e esmoado não foram avaliados. Por outro lado, peças que possuíam fissuras ou rachaduras a priori, foram descartadas não fazendo parte do lote.

Dessa maneira, foram analisadas as 2 faces de 120 peças com base na quantidade e tipo de nós, presença de medula e ataques biológicos. Segundo MOURA e PLETZ (2011) o limite do diâmetro dos nós é calculado através da soma dos nós presentes a cada 15cm, considerando-os como um grupo. Para isso, com ajuda de um gabarito, que dividia a peça a cada 15cm (G1, G2, G3...), cada nó foi medido e classificado, conforme pode ser visualizado na **Figura 31**.

Figura 31 - Classificação Visual das peças



Fonte: AUTORA (2023)

3.3.3 CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA DAS PEÇAS

3.3.3.1 Medição de Umidade

A umidade das peças foi aferida através do medidor de umidade de contato capacitivo “DUC 2050L”, da marca Digisystem (figura 26), preferencialmente na região central das peças e distante de nós, para que não ocorresse possíveis interferências no processo.

Figura 32 - Medidor de umidade DUC 2050L



Fonte: AUTORA (2023)

Os valores aferidos para a umidade das peças de Pinus podem ser observados na tabela abaixo:

Tabela 3 - Valores de umidades encontradas no lote de Pinus

Umidade Pinus	(%)
Valor máximo	17,00
Valor mínimo	4,20
Média	11,53
Desvio Padrão	2,09
Coefficiente de Variação %	18,17

Fonte: AUTORA (2023)

É importante relatar que esse procedimento foi realizado no início do mês de outubro de 2022, cinco meses após as peças serem adquiridas. Nesse período, as peças foram secas no ambiente com a ajuda de ventiladores, porém 35 peças ainda mantiveram o nível de umidade acima do determinado pela Norma Brasileira NBR 7190, de 12%, para a realização de ensaios estruturais.

3.3.3.2 Ensaio estrutural de flexão estática

O ensaio de flexão estática a 3 pontos (força concentrada no meio do vão livre) consiste na aplicação e monitoramento de uma carga aplicada em uma peça bi apoiada. Desse modo, todas as peças que serão utilizadas para a construção do elemento de laje foram ensaiadas para determinar o módulo de elasticidade (E_m) do lote, de acordo com os procedimentos de ensaio da ASTM D 4761 (1996).

Conforme pode ser observado na Figura 33, cada peça foi disposta em sua menor posição de inércia sobre dois cavaletes de madeira distanciados a 2,40m. Em seguida, para a aferição da flecha, foi utilizado um gabarito de apoio de madeira

(Figura 34) que facilitou a demarcação do centro da peça para posterior aplicação de uma força.

Figura 33 - Ensaio de Flexão Estático a 3 pontos



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 34 - Gabarito de madeira



Fonte: AUTORA (2023)

A intensidade da força foi definida através da Eq. (8), a partir das medidas médias das tábuas (300x25x2cm), limitando o deslocamento vertical máximo em $L/200$ (1,2cm). O MOE considerado foi o apresentado na NBR 7190/97 para o Pinus Taeda de 13.304 Mpa.

Para que o carregamento aplicado não ultrapassasse a região elástica da lâmina, foi utilizado uma carga de 100N, disponível no laboratório, e medida a sua flecha final até a referência determinada pela linha auxiliar, através de um paquímetro (Figura 35).

Figura 35 - Aferição da flecha resultante



Fonte: AUTORA (2023)

Com isso, o resultado obtido pela subtração da flecha inicial pela final determinou a flecha resultante de cada peça ensaiada, sendo utilizado o valor encontrado para a determinação do módulo de elasticidade estático, através da Eq. (8)

$$MOE_e = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta V \cdot I}$$

Eq. (8)

Onde

MOE_E = Módulo de elasticidade

Estático (MPa)

F = Força (N)

L = Vão da tábua (mm)

ΔV = Deslocamento ou flecha fina (mm)

I = Momento de inércia da seção transversal (mm⁴)

3.3.3.3 Resultados da classificação

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática podem ser observados na **Figura 36**. A média dos módulos encontrados foi de 4921 Mpa com desvio padrão de 3341Mpa, mostrando grande variação entre as peças.

Figura 36 - Módulo de elasticidade à flexão (E_m)

Peça	EM(Mpa)	Peça	EM(Mpa)	Peça	EM(Mpa)	Peça	EM(Mpa)
1	3563	31	6560	61	5225	91	4392
2	3644	32	5319	62	3835	92	2450
3	2926	33	2190	63	1874	93	3690
4	3613	34	4160	64	2708	94	4024
5	5323	35	6265	65	5788	95	6449
6	3062	36	5574	66	5397	96	2057
7	3582	37	4198	67	3439	97	5646
8	2009	38	5824	68	6527	98	6092
9	2912	39	4091	69	3900	99	4856
10	3273	40	4987	70	5354	100	11925
11	2899	41	2549	71	5830	101	2433
12	2501	42	4344	72	3684	102	8372
13	6570	43	3085	73	4658	103	4163
14	5119	44	3523	74	12669	104	8555
15	4387	45	2247	75	5765	105	5013
16	3888	46	3917	76	2894	106	6051
17	3618	47	5038	77	6144	107	4365
18	3248	48	10080	78	3866	108	33710
19	1835	49	5677	79	5533	109	6396
20	4940	50	4596	80	3294	110	6244
21	3627	51	4269	81	2961	111	3642
22	3314	52	7420	82	4667	112	6866
23	2685	53	7056	83	10715	113	4278
24	2151	54	6476	84	2759	114	4456
25	2059	55	4569	85	3105	115	3564
26	3355	56	3399	86	2452	116	4436
27	6246	57	6286	87	4636	117	9990
28	4779	58	4752	88	4927	118	3868
29	2025	59	10493	89	4427	119	4412
30	4547	60	4951	90	3323	120	4187
Média						4921,108 Mpa	
Desvio Padrão						3341,343 Mpa	

Fonte: AUTORA (2023)

3.4 MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA.

Para um melhor aproveitamento das tábuas, dobrando a quantidade de corpos de prova a serem construídos e ensaiados, optou-se por seccioná-las ao meio. Por conseguinte, as peças que possuíam largura de 25cm, agora encontram-se, em média, com 12 cm de altura. Dessa maneira, como forma de minimizar o desvio padrão encontrado no lote e obter corpos de prova com propriedades de rigidez média e desvio padrão similares, dividiu-se a amostra em 6 grupos de tábuas.

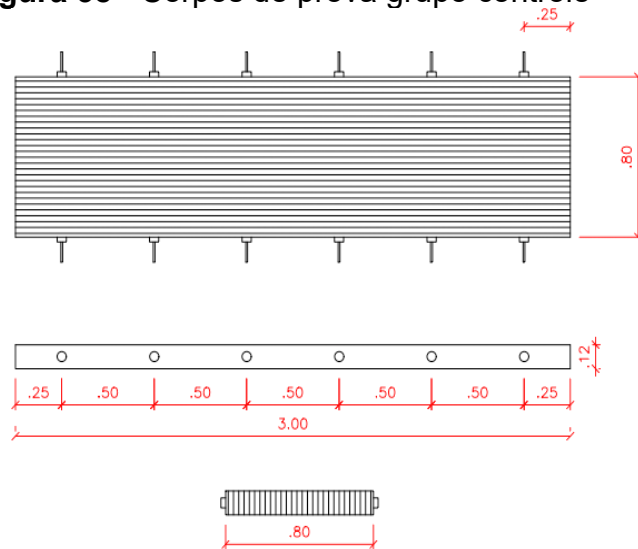
Figura 37 - Módulo de Elasticidade dos corpos de prova

Módulo de Elasticidade - EM (Mpa)			
Corpo de prova	Média	Desvio padrão	COV%
G1	4551	1823	40
G2	4535	1762	38
G3	4560	1780	39
G4	4551	1823	40
G5	4535	1762	38
G6	4560	1780	39

Fonte: AUTORA (2023)

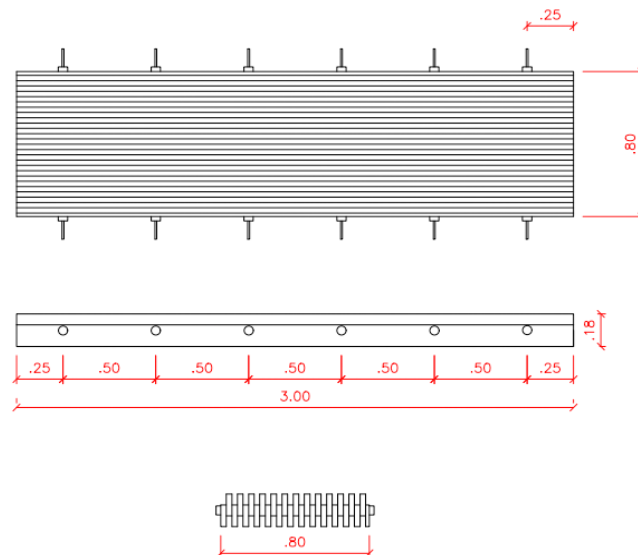
Como pode ser observado na imagem acima, o Módulo de Elasticidade dos corpos de prova manteve-se entre 4535 e 4560Mpa e o COV entre 38 e 40%.

Como vários estudos são encontrados na literatura sobre o comportamento de tabuleiros lamelados protendidos, optou-se em construir apenas 2 corpos de prova com essa configuração (CP 4 e 6) (**Figura 38**). Nesse estudo, eles serão intitulados como corpos de prova grupo “CONTROLE”, pois serão parâmetro de comparações para com os demais.

Figura 38 - Corpos de prova grupo controle

Fonte: AUTORA (2023)

Desta forma, os outros 4 corpos de prova com lâminas deslocadas e alternadas, (CP 1,2,3 e 5) serão referenciados como corpos de prova grupo “PROPOSTO”.

Figura 39 Corpos de prova grupo proposto

Fonte: AUTORA (2023)

3.4.1 Furação

Após a divisão das tabuas em 6 grupos, foram realizados furos para a passagem das barras roscadas para a execução dos CPs. Foram utilizadas como agulhas de protensão nesse estudo, barras roscadas 5/8", devido a disponibilidade desse material para uso na Universidade Estadual de Londrina.

Para a realização do processo de furação das peças, também foram utilizadas brocas com diâmetro 5/8" e duas peças como gabarito para facilitar a execução dessa etapa (**Figura 40**).

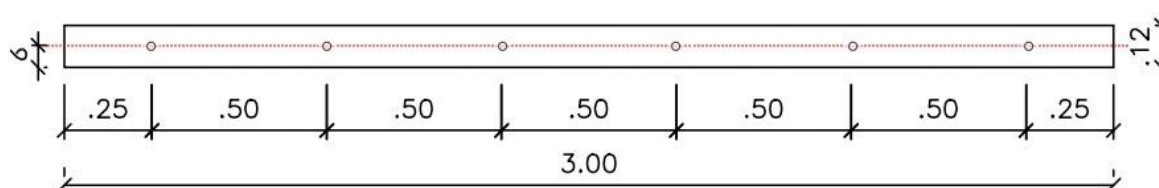
Figura 40 - Gabarito para furação



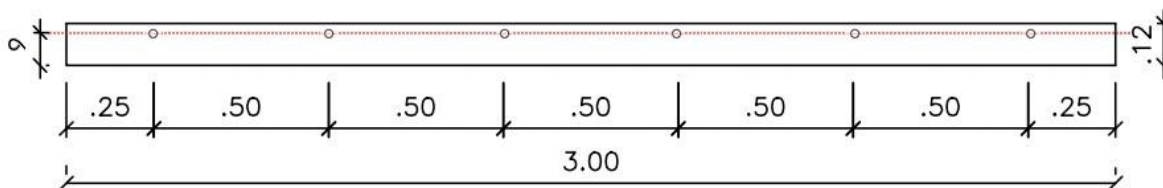
Fonte: AUTORA (2023)

Conforme pode ser observado, a marcação "A" representa o gabarito das tabuas referentes ao CP4 e 6 ou seja, com perfuração centralizada. Já a marcação "B," demonstra o gabarito que foi utilizado para os corpos de prova CP1,2,3 e 5. As imagens a seguir, ilustram as medidas dos gabaritos.

Figura 41 - Gabarito A (Dimensões em metros)



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 42 - Gabarito B (Dimensões em metros)

Fonte: AUTORA (2023)

3.4.2 Montagem dos corpos de prova

Após o processo de furação das tábuas, iniciou-se a montagem dos corpos de prova.

Um cuidado especial foi tomado para que as peças das extremidades possuísem o maior módulo de elasticidade do conjunto. Desta maneira, entende-se que estas sejam as mais resistentes e dessa forma evitam-se possíveis esmagamentos decorrentes da protensão aplicada. Já o posicionamento interno das peças nos corpos de prova, foram distribuídos aleatoriamente.

Para facilitar o encaixe das peças, os corpos de prova foram montados em posição vertical (**Figura 43**). Em um primeiro momento, todas as 6 barras roscadas foram colocadas em uma peça de extremidade, para facilitar a condução das peças seguintes. Nesse processo, demonstrou-se necessário a aplicação de parafina nas barras roscadas para facilitar a sua passagem entre as peças.

Não foi tomado nenhum cuidado relativo ao posicionamento de nós e outros defeitos nas lâminas. Neste aspecto, as lâminas foram montadas randomicamente.

Figura 43 – Lay up das peças



Fonte: AUTORA (2023)

Os componentes tiveram sua massa aferida e, de acordo com a estimativa inicial, ficam com 130Kg em média.

Finalizada a montagem dos 6 corpos de prova (Figura 44), iniciou-se a aplicação de protensão.

Figura 44 - Corpos de prova



Fonte: AUTORA (2023)

O sistema de protensão mais utilizado, encontrado na literatura, para tabuleiros simples protendido transversalmente é o DYWIDAG. Como já apresentado, esse conjunto comercial de protensão é composto por uma placa de ancoragem retangular, porca sextavada e uma placa de distribuição de aço comum, podendo ser retangular ou quadrada.

Entretanto, nesse trabalho também avaliou a possibilidade da utilização de outros tipos de aços como alternativa mais econômica em comparação aos da DYWIDAG.

Conforme pode ser observado na **Figura 45**, foram mantidas as porcas sextavas para a aplicação da protensão, entretanto, as placas de distribuição do sistema DYWIDAG, foram substituídas por arruelas 5/8" lisas.

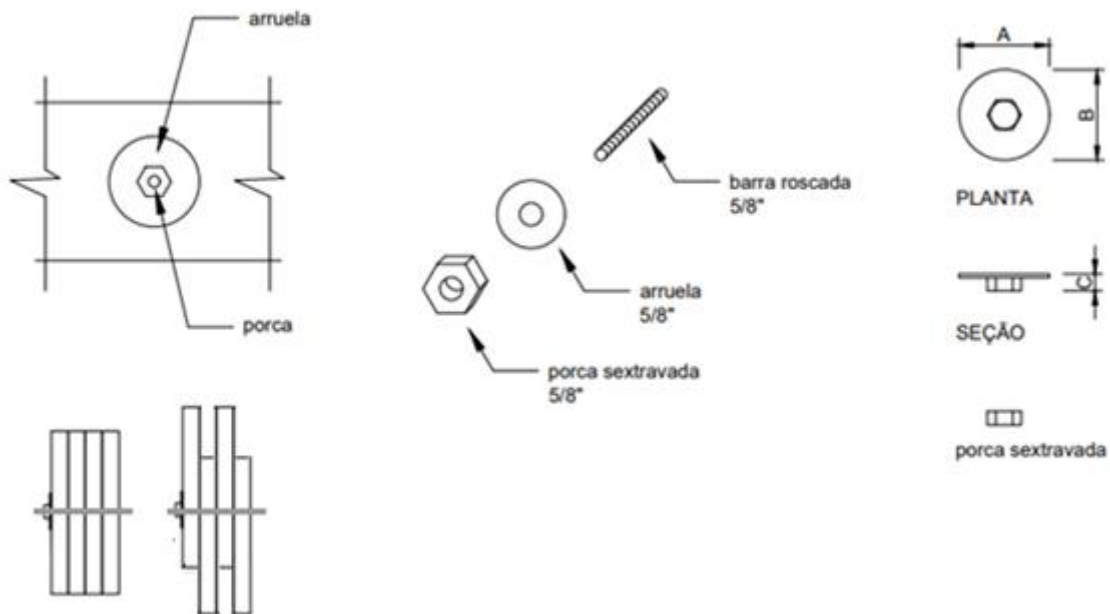
Figura 45 - Porcas sextavadas e arruelas



Fonte: AUTORA (2023)

Esse material além de ser comercialmente mais acessível, facilita o processo de montagem pois, não há a necessidade de furação para a passagem da barra roscada (**Figura 46**).

Figura 46 - Esquema ilustrativo sistema de protensão



Fonte: AUTORA (2023)

3.4.3 Protensão dos protótipos.

Após o posicionamento das barras e lâminas iniciou-se o processo de protensão. Para determinação da carga a ser aplicada, iniciou-se calculando a área da arruela 5/8" através da equação (9):

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Eq.(9)

Onde:

$$\pi = 3,14$$

d^2 = diâmetro da arruela (59,7mm)

$$A = \frac{3,14 \cdot 59,7^2}{4} = 2797 \text{ mm}^2$$

Em seguida, encontrou-se a Tensão máxima de tração da barra Eq.(10)

$$\tau_{es} = \frac{F_{es}}{A}$$

Eq. (10)

Onde:

τ_{es} = Tensão de esmagamento * Encontrada para o Pinus Taeda (ABNT 7190/97)

F_{es} = Força de esmagamento

A = Área

$$F_{es} = A \cdot \tau = 2797.28 = 7833N.mm$$

Por fim, foi calculado o momento do torque, através da equação (11):

$$F_t = \frac{M}{0.2 \cdot \emptyset}$$

Eq. (11)

Onde:

F_t é Força de tração na barra (N)

M é o torque (N.mm)

\emptyset é o diâmetro da barra (mm)

$$M = 7833 \cdot 0,2 \cdot 15,8 = 24872N.mm$$

A aplicação da protensão foi realizada manualmente, com o auxílio de uma chave de torque **Figura 47**, e realizada em três etapas seguindo o método proposto por TAYLOR & CSAGOLY(1979) apud RITTER (1992), que sugere como protensão inicial um valor de 2,5 vezes o valor do projeto, e no mínimo mais 2 reprotensões ao nível inicial aplicado.

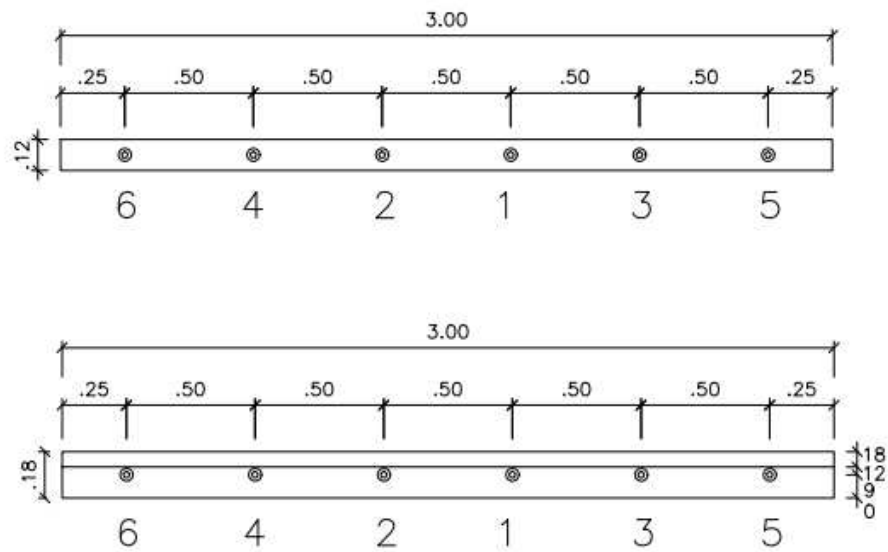
Figura 47 - Aplicação da protensão



Fonte: AUTORA (2023)

Desta maneira, a primeira protensão ocorreu no momento da construção do corpo de prova com um torque aplicado de **2,5** x valor do projeto, ou seja, **62181 N.mm**

A sequência de protensão foi executada do centro do vão na peça em direção às extremidades, seguindo as recomendações padrão para protensão em estruturas de concreto (**Figura 48**). Essa abordagem contribui para minimizar a influência na distribuição das cargas entre as barras durante o processo de protensão.

Figura 48 - Ordem aplicação da protensão

Fonte: AUTORA (2023)

É importante relatar que, no momento da protensão, apesar das tábuas externas possuírem o maior módulo de elasticidade do conjunto, ainda sim ocorreram esmagamentos entre as lâminas e arruelas **Figura 49**. Dessa maneira, deveriam ter sido colocadas placas ou arruelas área de contato maior para que, a força aplicada fosse distribuída em uma área conseqüentemente maior.

Figura 49 - Esmagamento lâmina

Fonte: AUTORA (2023)

3.4.4 Reprotensão

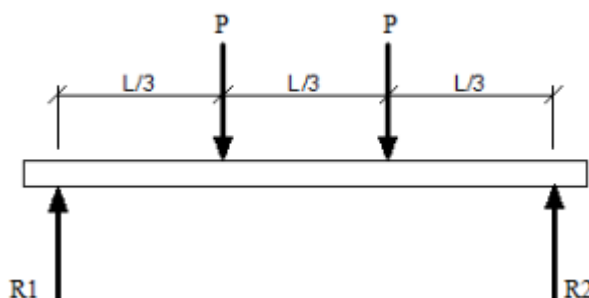
Após dois dias, foi realizada a primeira reprotensão nos protótipos. Mais uma vez, com o auxílio da chave de torque, foi aplicado. O torque de cálculo correspondente a 24872N.mm em cada agulha do conjunto de corpos de prova. Nesta primeira aplicação de reprotensão, não houve necessidade de ajustar o nível inicial aplicado imediatamente após a montagem.

Posteriormente na semana 8, foi reaplicado o torque de cálculo (24872N.mm). É importante salientar que este trabalho não tem como objetivo analisar a perda de protensão nos corpos de prova. Entretanto, pode-se perceber, na última reprotensão, que os protótipos haviam perdido uma parte significativa da protensão inicial, que foi de 2,5 vezes o torque de cálculo. Foi então necessária a reaplicação de 5% da protensão inicial (aproximadamente $\frac{1}{4}$ de volta no torquímetro) para se ajustar a tensão ao torque de cálculo.

3.4.5 Ensaio de Flexão em Quatro Pontos

Um ensaio de flexão em quatro pontos, consiste em quatro pontos de apoio, localizados a um terço dos extremos sendo: dois pontos internos utilizados para aplicação da carga e dois nas extremidades.

Figura 50 - Teste de flexão a quatro pontos



Fonte: CÓRDOBA et.al (2016)

O carregamento realizado dessa maneira resulta em um momento fletor constante ao longo do terço central da viga, proporcionando um estado de tensão uniforme nessa região. Evitando os esforços de cisalhamento, o que resulta em flexão pura. Esse sistema permite que as deformações no centro da viga não sejam afetadas por pontos de concentração de tensões, uma vez que as cargas estão concentradas nos terços médios. Em resumo, esse arranjo experimental de carregamento em quatro pontos minimiza as incertezas, erros propagados e a dispersão dos resultados (LIMA, 2017)

Assim, todos os corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão em quatro pontos, realizados no laboratório de estruturas da UEL com auxílio de um pórtico metálico de compressão. Entre os equipamentos utilizados, encontram-se o cilindro hidráulico com capacidade de 500kN, células de carga de 2, 10 e 30 toneladas, e um LVDT (Linear Variable Differential Transformer) de 50mm, para aferição dos deslocamentos verticais. As cargas foram aplicadas de cima para baixo através do cilindro hidráulico, sobre um perfil metálico que transferiu o carregamento para duas vigas que dividiam os terços do vão teórico. O posicionamento dos elementos está detalhado a seguir:

Figura 51 - Posicionamento



Fonte: AUTORA (2023)

É importante relatar que, todos os CPs foram capeados na fibra superior por tábuas transversais à largura do componente. Esta medida tem o objetivo de acrescentar o elemento de regularização do piso (em uma situação real), que seria executado através de uma chapa de contraplacado pregada sobre a fibra comprimida do componente laje. Utilizou-se madeira serrada por questões de custo.

Cada ensaio de flexão, ocorreu em duas fases. Iniciou-se com a aplicação de três ciclos de carga de 8kN com o intuito de acomodar os elementos no protótipo e em seguida, verificado o carregamento necessário para que os corpos de prova atingissem o deslocamento máximo (Eq12) estabelecido pela norma ABNT NBR 8800/2008:

$$l/350$$

Eq.(12)

Onde:

L = Vão teórico.(cm)

Desta maneira, foi considerado (L=290) sendo o vão teórico, encontrando um valor para o deslocamento de 1,16cm

Na segunda fase, verificou-se o carregamento máximo para levar o corpo de prova a ruptura, assim como seu deslocamento nesse momento.

A princípio, foram estabelecidos para os ensaios, vão teórico de 290cm e uma célula de carga de 10 toneladas. Entretanto, após o primeiro ensaio (CP6), foi verificada uma resistência superior à prevista para o corpo de prova (abordada mais detalhadamente nos resultados). Por segurança, foi utilizada então uma célula de carga com capacidade de 30 toneladas, disponível no laboratório.

Além disso, o vão teórico dos ensaios seguintes, também precisou ser alterado, pois o perfil metálico que transferiu a carga aplicada no primeiro ensaio não fletiu, tendo que ser substituído.

Figura 52 - Perfil metálico



Fonte: AUTORA (2023)

Dessa forma, para que novo perfil metálico, disponível no laboratório, pudesse ser utilizado, o vão teórico foi reduzido de 290cm para 280cm (2800 mm), estabelecendo deslocamento máximo normativo de 8mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na **Tabela 4** - Carregamentos obtidos são apresentados os valores dos carregamentos obtidos no deslocamento vertical máximo normativo (L/350 para viga de piso), conforme o anexo C da NBR 8800 (2008) e na ruptura dos corpos de prova.

Tabela 4 - Carregamentos obtidos

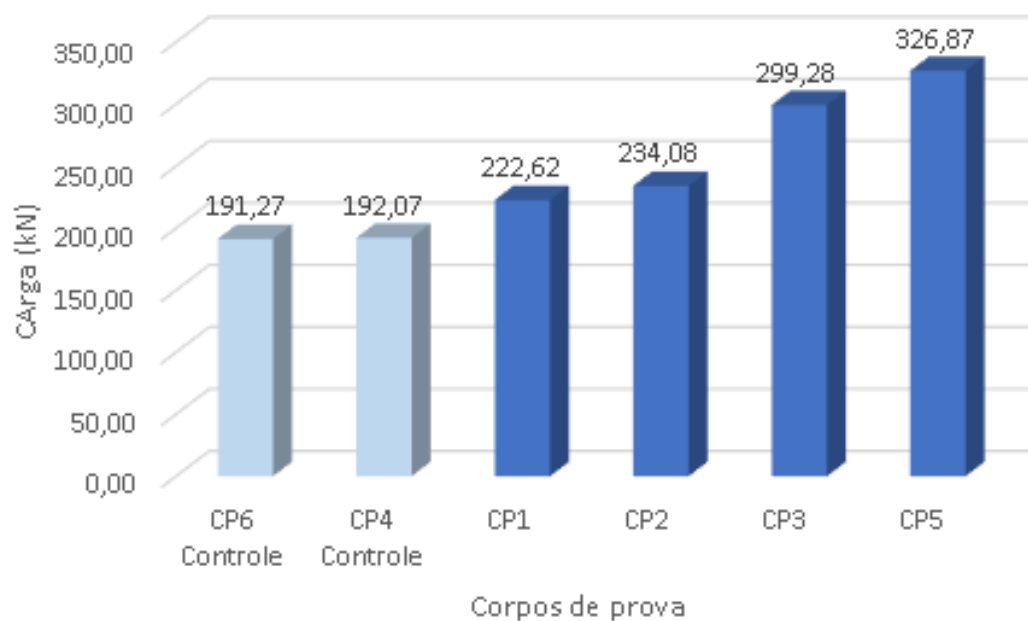
	L/350 = 8mm	Ruptura
	Carga (kN)	Carga (kN)
CP6 Controle	19,127	91,072
CP4 Controle	19,207	74,593
Média controle	19,167	83,283
DPAD	58	11233
COV %	0,3	13,2
CP1	22,262	83,522
CP2	23,408	64,247
CP3	29,928	75,178
CP5	32,687	79,76
Media	27,071	75,677
DPAD	2863	2564
COV %	10,4	3,3
Ganho rigidez%	41,2	

Fonte: AUTORA (2023)

Quanto ao carregamento na ruptura, observa-se que os corpos de prova do grupo controle (CP4 e CP6), suportaram em média um carregamento aproximadamente 10% maior do que os demais CP's (CP1, CP2, CP3 e CP5). Entretanto a análise dos coeficientes de variação (COV%) dos dois grupos de CP's (controle e proposto), mostra que os CP's do grupo proposto, apresentam um maior nível de homogeneidade

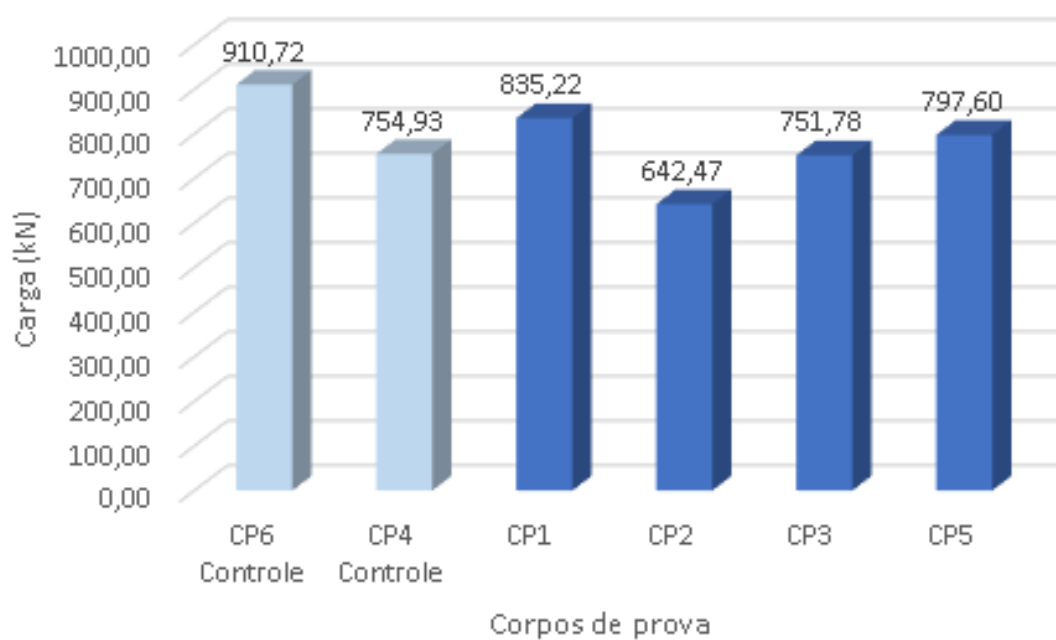
Já no carregamento relativo ao deslocamento máximo normativo L/350, apesar do Coeficiente de variação ser maior no grupo proposto, ainda se observa um valor relativamente baixo, variando apenas 10,4%, o que aponta para a confiabilidade do sistema. Além disso, observa-se um ganho de rigidez de 41,2% em relação ao grupo controle. As Figura 53 Figura 54, ilustram os carregamentos na ruptura e L/350, respectivamente.

Figura 53 - Carregamento no L/350



Fonte: AUTORA (2023)

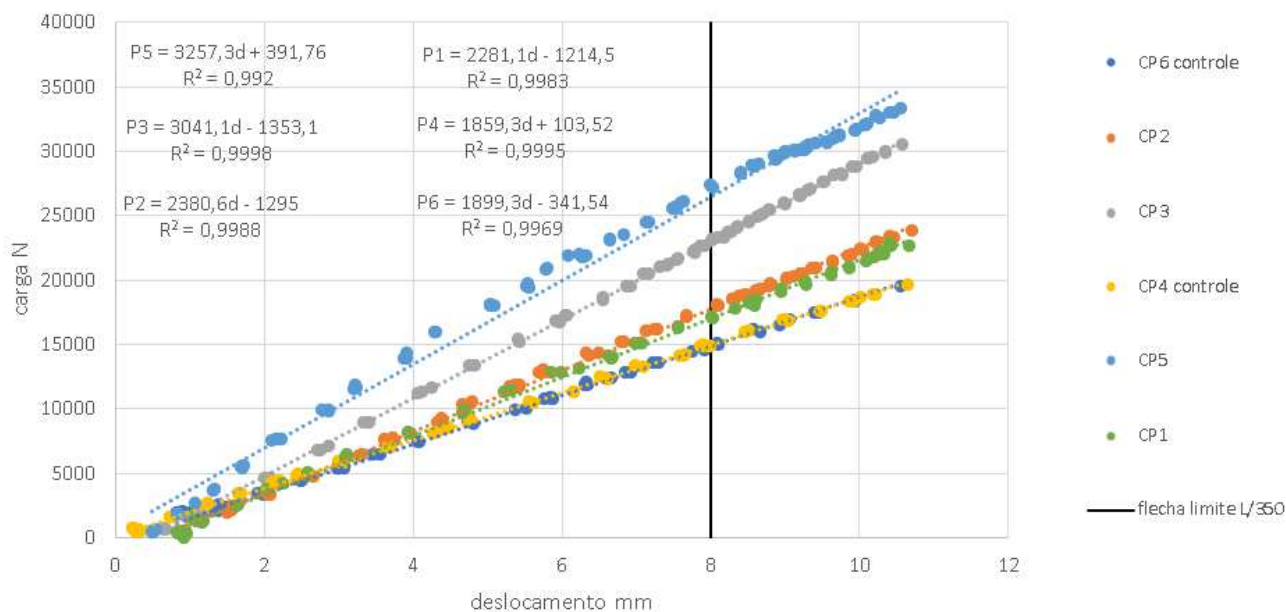
Figura 54 - Carregamento na Ruptura



Fonte: AUTORA (2023)

Para melhor visualização dos resultados, a **Figura 55** mostra o comportamento de todos os CP com as respectivas retas de regressão, no trecho de carregamento até o deslocamento máximo normativo (8mm), bem como as equações respectivas e coeficientes de determinação R^2 .

Figura 55 - Rigidez comparativa



Fonte: AUTORA (2023)

A figura mostra que o comportamento de todos os CPs é praticamente linear o que se verifica pelos valores de R^2 das retas de ajuste próximos a 1, indicando excelente correlação entre as entre a reta teórica e os pontos experimentais.

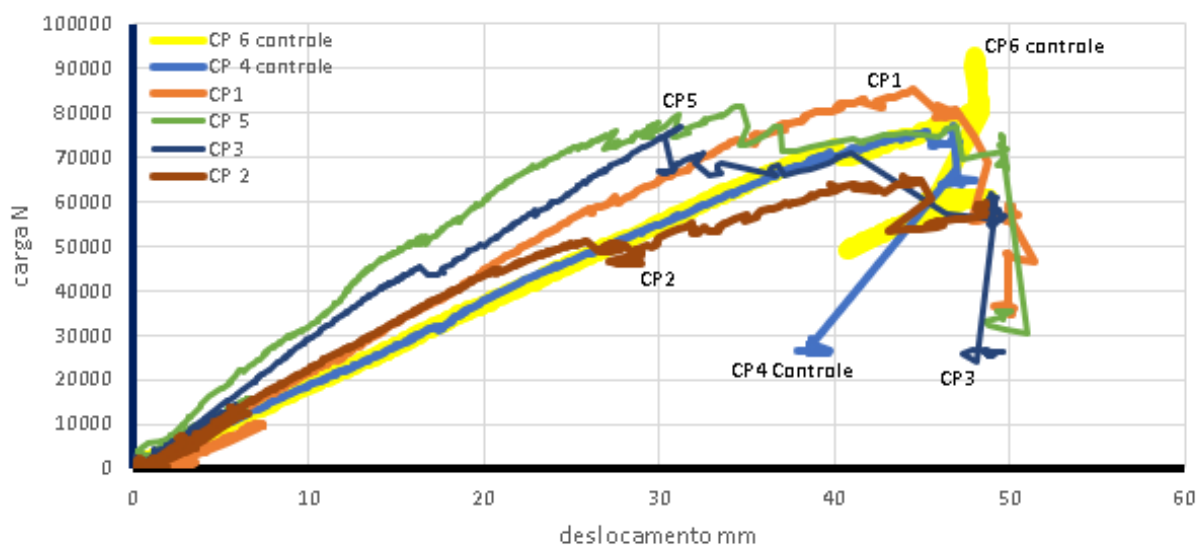
Percebe-se ainda que, os corpos de prova de controle (CP4 e CP6) exibiram comportamento muito similar com pontos se sobrepondo, indicando que, neste trecho os CPs são muito homogêneos. Apesar disto, demonstraram menor capacidade de carga, sendo os menos rígidos do estudo, com média de carga de 19545N para atingir a flecha limite normativa.

Os corpos de prova do grupo proposto (CP1, CP2, CP3 e CP5), apresentarem comportamentos mais dispersos que os do grupo controle (CP4 e CP6), no entanto, todos mostraram rigidez superior com média de carga aplicada 27606N na flecha limite.

Desta maneira, observa-se uma potencialização, em média, de 41,2% na rigidez do conjunto através da estratégia de deslocamento vertical intercalado das lâminas da seção transversal do corpo de prova, em comparação ao arranjo geométrico com as bordas alinhadas.

A figura abaixo, traduz o comportamento dos deslocamentos em cada ensaio.

Figura 56 - Deslocamento LVDTs de 50mm de todos os corpos de prova



Fonte: AUTORA (2023)

Pode-se observar que um corpos de prova do grupo controle CP6, manteve um deslocamento linear constante até 40mm e em seguida começa gradativamente o processo de ruptura até o colapso. O CP4 (controle) apresenta uma queda de rigidez em aproximadamente 18 mm para depois seguir a mesma tendência do seu par CP6. Em contrapartida, nos demais corpos de prova são verificadas variações de deslocamentos a partir de 18 mm. Desde o início, pequenos rompimentos não lineares são observados no gráfico, que se intensificam ao se aproximar da ruptura.

4.1 MODO DE RUPTURA

De uma maneira geral, o que se observa na ruptura é a falha de lâminas individualmente, começando das que tem algum tipo de defeito ou que registram um menor módulo de elasticidade.

Nas figuras a seguir, pode-se verificar as faces laterais dos corpos de prova no momento da ruptura, assim como uma análise do padrão de rompimentos das tabuas.

Figura 57 - Corpo de prova 01



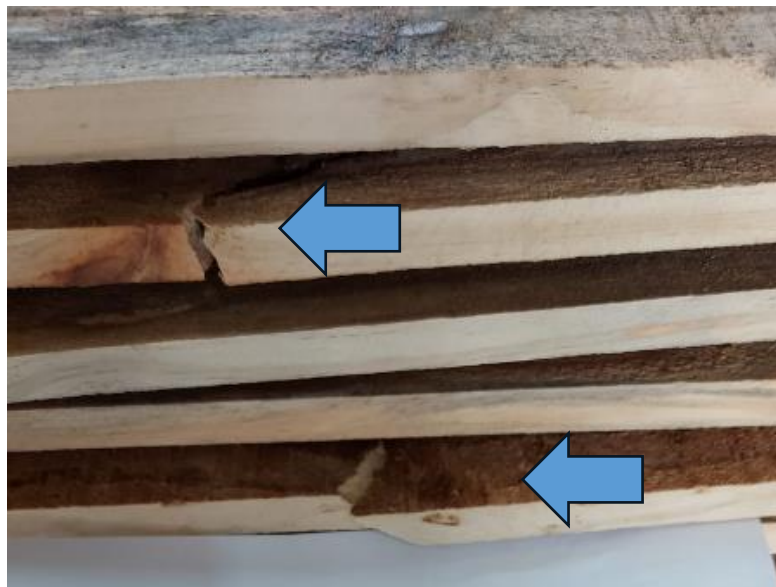
Fonte: AUTORA (2023)

Figura 58 - Rupturas lâminas CP1



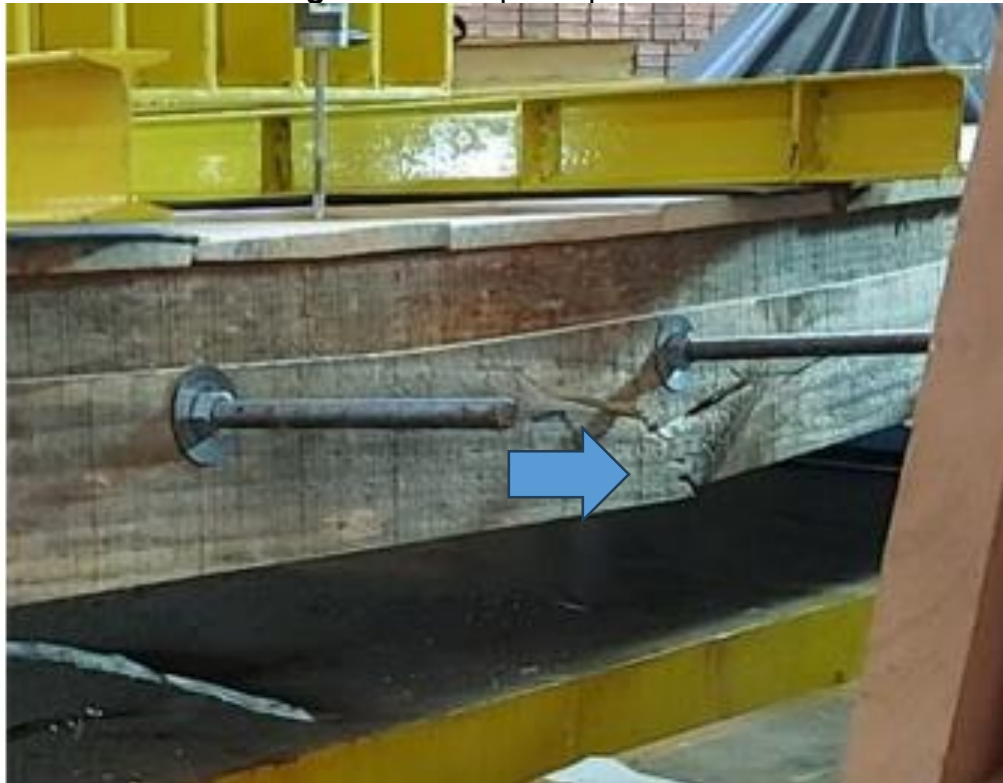
Fonte: AUTORA (2023)

Figura 59 - Rupturas lâminas CP1 – Detalhe



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 60 - Corpo de prova 02



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 61 - Rupturas lâminas CP2



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 62 - Rupturas lâminas CP2 – Detalhe



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 63 - Corpo de prova 03



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 64 - Rupturas lâminas CP3



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 65 - Rupturas lâminas CP3 - Detalhe



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 66 - Corpo de prova 04



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 67 - Rupturas lâminas CP4



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 68 - Rupturas lâminas CP4 – Detalhe



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 69 - Corpo de prova 05



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 70 - Rupturas lâminas CP5



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 71 - Rupturas lâminas CP5 - Detalhe



Fonte: AUTORA (2023)

Na figura abaixo, a ruptura se inicia no nó presente na fibra tracionada e se desloca para a região do furo da agulha de protensão

Figura 72 - Corpo de prova 06



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 73 - Rupturas lâminas CP6



Fonte: AUTORA (2023)

Na ruptura, como se esperava, as falhas encontram-se centralizadas no terço médio do vão livre, onde o momento fletor é máximo, concentrando as tensões de tração, com direcionamento na diagonal.

Ademais, de maneira geral, em poucos casos as peças foram rompidas e separadas em mais de duas partes e em muitos casos, se observaram apenas fissuras. Além disso, a maioria dos rompimentos aconteceram onde já existiam defeitos nas peças, como os nós Figura 74 Figura 75.

Figura 74 - Rompimentos Nós



Fonte: AUTORA (2023)

Figura 75 - Rompimentos Nós



Fonte: AUTORA (2023)

Verificou-se também que, nos corpos de prova controle, a quantidade de lâminas rompidas foi menor.

A tabela abaixo mostra que o maior contato entre as lâminas, de certa forma, enrijece o conjunto e, na ruptura, as lâminas mais resistentes contraventam as menos resistentes.

Tabela 5 - Quantidade de lâminas rompidas

	Quantidade de Lâminas	
	Rompidas	Não Rompidas
CP1	27	13
CP2	21	19
CP3	31	9
CP4	38	2
CP5	24	16
CP6	19	21

Fonte: AUTORA (2023)

No regime de carregamento mais severo, as fragilidades individuais das lâminas, se tornam menos importantes na medida que a área de contato entre elas aumenta. Ou seja, ocorre uma “pulverização” dos defeitos no componente laje como um todo, como descrito por FLEMING e RAMAGE (2020).

Contrariamente, em um mesmo nível de carga, no elemento com lâminas desalinhadas (grupo proposto) os defeitos individuais na borda tracionada sobretudo, assumem um papel mais crítico, sobretudo na ruptura, deixando esta área da lâmina sem apoio lateral. Submetendo o defeito a tensões de tração originárias do carregamento.

Em nenhum dos casos se observou o rompimento das agulhas de protensão, nem mesmo a rosca foi danificada, mostrando a possibilidade de se diminuir o diâmetro das barras utilizadas.

Não se observou, em nenhum dos casos, uma ruptura frágil, instantânea. A falha sempre se deu de forma gradativa à medida que as lâminas se rompiam individualmente, demonstrando grande vantagem da redundância do sistema.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa se propôs a estudar a possibilidade do emprego de lajes de lâminas de madeira protendidas transversalmente, normalmente empregadas na construção de pontes, para utilização em edifícios, particularmente os construídos em *woodframe*.

Como estratégia de melhorar o desempenho destes componentes, utilizando o mesmo volume de madeira, decidiu-se proceder ao desalinhamento vertical das lâminas a fim de se aumentar a Inércia do conjunto, melhorando com isto, seu comportamento a flexão. Os elementos de protensão usados, foram barras roscadas, de fácil obtenção no mercado e de baixo custo.

Os resultados obtidos, evidenciam comportamentos distintos entre os corpos de prova do grupo controle e o proposto, quando submetidos a cargas de flexão. Observou-se que o grupo controle na ruptura, suportou, em média, um carregamento aproximadamente 10% maior do que os demais. Além disso, os dois CPs do grupo apresentaram um comportamento muito semelhante mantendo um deslocamento linear constante até 40mm para em seguida e gradativamente iniciar o processo de ruptura até o colapso. Em contrapartida, demonstrou capacidade de carga significativamente inferior referente ao nível de deslocamento da flecha limite normativa, sendo os corpos de prova menos rígidos do estudo.

Já os corpos de prova propostos, apresentaram excelentes resultados. Em relação ao carregamento na ruptura, observou-se variação de apenas 3,3%, contra 13,2% do grupo controle. Desta maneira pode-se afirmar que os corpos de prova, possuem um nível de confiabilidade muito aceitável, apresentando-se como o grupo mais homogêneo. Quanto ao carregamento relativo à flecha normativa $L/350$, quando comparados ao grupo controle, observamos uma potencialização expressiva de rigidez, em média, de 41,2%. Supondo-se que toda estrutura em serviço deva obedecer ao Estado Limite de Utilização, traduzido pelo valor da flecha elástica, o componente apresenta clara vantagem em relação ao do grupo controle.

Conclui-se, portanto, que a estratégia utilizada nesta pesquisa em realizar deslocamentos verticais intercalados nas lâminas da seção transversal dos tabuleiros de madeira laminada protendida transversalmente, mostra-se altamente eficaz, apresentando um aumento significativo de sua rigidez.

No grupo proposto, aqueles defeitos individuais das lâminas situados na fibra tracionada, presentes no centro do vão, onde as tensões são mais elevadas e que se encontram descobertos sem contraventamento lateral, exercem um papel preponderante na ruptura do componente. Este efeito é menor no grupo controle no qual cada lâmina está inteiramente apoiada em toda a largura de sua seção transversal.

Uma forma para reduzir este efeito, seria, realizar *lay-up* judicioso prévio, posicionando os defeitos, nós e fibras inclinadas, na fibra superior comprimida da laje, solicitação na qual os defeitos têm menos influência na ruptura.

Outra possibilidade é a de adicionar um plano rígido pregado contínuo (chapa de contraplacado, p.e.) ligando todas as seções salientes das lâminas contraventando todas elas e fazendo com que trabalhem solidariamente.

Um estudo a ser empreendido, é a influência da variação de deslocamento vertical entre lâminas no comportamento do componente, assim como o espaçamento de agulhas de protensão ao longo do comprimento da laje. O componente proposto, neste aspecto é desfavorecido, pois o furo da barra se aproxima muito das bordas e, no caso da proximidade com a borda tracionada (**Figura 42**)

Uma vez que a fratura é potencializada pela presença do furo da agulha, o aumento da área de distribuição da força de tração ocasionada pela protensão da barra, seria desejável e facilmente realizável através do aumento da arruela de contato entre a madeira e a porca ou, substituição por uma chapa metálica de maior área.

Observou-se que no primeiro procedimento de protensão, que aplicou uma pressão 2,5x mais alta que ao torque de cálculo, houve esmagamento da madeira ao redor do furo. Uma solução bastante simples, seria a introdução de duas lâminas de madeira nobre com alta resistência á compressão normal nas extremidades do componente.

Concluiu-se também que, a barra de protensão foi superdimensionada, não tendo sofrido dano em nenhum dos experimentos. Apesar do cálculo indicar uma barra de menor diâmetro, optou-se por uma de 5/8" pela sua disponibilidade no laboratório. Uma barra mais fina, seria ao mesmo tempo mais econômica e mitigaria o efeito do diâmetro do furo no comportamento à ruptura do componente laje. Além disso, estas barras se apresentam com comprimento comercial de até 3 metros, aumentando a possibilidade de larguras do componente laje, que na maior parte das construções equivale a largura de um cômodo muitas vezes. Seria possível igualmente posicionar

várias lajes de forma adjacente para cobrir um vão livre maior que 3 metros, justapondo-se vários componentes lado a lado. Solução muito interessante para pequenos e médio ambientes

O componente assim concebido, passa a ser um elemento pesado comparando-se às lajes maciças de concreto, um grande ganho para construção em madeira.

Nos dois grupos, observou-se uma ruptura gradual, com “avisos” para cada lâmina rompida, o que em termos de segurança estrutural, é amplamente positivo.

As conclusões aqui apresentadas, representam um início promissor para que novas pesquisas sejam realizadas dando seguimento a adaptação proposta nessa pesquisa, nos tabuleiros de madeira protendida transversalmente que são até o momento, utilizados na construção de pontes.

Desta maneira, utilizar essa tecnologia proposta, como um elemento estrutural de laje maciça em residências, poderá contribuir para a resolução de problemas acústicos encontradas em sistemas de assoalhos de madeira, assim como as deformações mecânicas apresentadas nos locais mais solicitados desse sistema.

6 REFERÊNCIAS

ACOSTA, CAIO CESAR VELOSO. **Tabuleiro laminado protendido de Pinus sp. com cordoalhas engraxadas**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2007

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Nbr-7190 **Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro. 1997.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Nbr-7190 **Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro. 2022.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: 2008.

ALVES, N. M. P. **Análise de pontes de madeira protendidas transversalmente por vigas -T**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

Almeida, A. C; Silva, R. D; Moura, J.D. M. **Potencial de implantação do sistema construtivo Cross Laminated Timber – CLT no Brasil**. Brazilian Journal of Development. 2021

ASTM D 4761, 1996. D 4761: **Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material**. Philadelphia

ASIF, M. **Sustainability of timber, wood and bamboo in construction.** In: **Khatib, J.** (Ed.), Sustainability of Construction Materials. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009. pp. 31–54.

BAZLI, M; HEITZMANN, M; ASHRAFI, H. **Long-span timber flooring systems: A systematic review from structural performance and design considerations to constructability and sustainability aspects.** Journal of Building Engineering, Volume 48, 2022.

BUCHAIM, R. **Concreto Protendido: Tração axial, Flexão simples e força cortante.** Londrina. Editora da Universidade Estadual de Londrina (EDUEL), 2007. 256p.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood products.** Florida: Krieger Publishing. 1993, 712p.

BONA, D. **Estudo do ensaio de flexão em quatro pontos como método para avaliação da tensão de aderência entre chapisco e substrato de concreto.** Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia Curso de Graduação em Engenharia civil. 2022

BRANDNER R, FLATSCHER G, RINGHOFER A, ET AL. **Cross laminated timber (CLT): overview and development.** Eur J Wood Wood Prod 2016; 74: 331–351.

CALIL, J. C; BARALDI, L.T; STAMATO, G. C. **Estruturas de Madeira.** 1998.

CARTAGENA, JUNTA DEL ACORDO. **Manual de diseño para maderas del grupo andino.** Lima, Padt-Refort, 1994.

CEFERINO, G. E. U. **Pontes protendidas de madeira com cordoalhas**

engraxadas: perda da protensão. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

CHEUNG, A.B. **Tabuleiro ortotrópico treliçado protendido transversalmente para aplicação em pontes de madeira.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CÓRDOBA, F.O ; TEREZO, R.F; BOURSCHEID, C.B ; STUPP, A. M.
Análise dos métodos analítico e experimental de vigas em madeira laminada colada de schizolobium parahyba var. amazonicum tratadas quimicamente. XV BRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira 09-11/Mar, 2016, Curitiba, PR, Brasil.

CROCETTI, R., EKHOLM, K., KLIGER, R. **Stress-laminated-timber decks: state of the art and design based on Swedish practice.** European Journal of Wood and Wood Products, 74 (3), pp. 453-461. 2016.

DAVALOS JF, QIAO P, WANG J, ET AL. **Shear Moduli of structural composites from Torsion tests.** J Compos Mater 2002; 36: 1151–1173. DOI: 10.1177/0021998302036010486.

DIAS, N. S.; SALADO, G. **Estudo das soluções utilizadas para ligação entre elementos em sistemas estruturais de madeira, aço e tubetes de papel.** Encontro nacional de tecnologia no ambiente construído, 2018. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 3067–3077

DIAS, T. M. P. **Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural.** 2008. 315 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2008. Disponível em: < <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12485> >

DURÃO, L. M. P; GONÇALVES, D. J. S; MOURA, M.F.S. F; MARQUES, A.T.

Modelação da furação de laminados por elementos finitos. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. Lisboa, Portugal. 2012

DYWIDAG SYSTEMS INTERNACIONAL. **Sistemas de Protensão com Barras DYWIDAG.** Aplicações Estruturais.. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/pbastos/Protendido/DYWIDAG-Brasil.pdf> . Acesso em: 04 de junho de 2022

EKHOLM, K., EKEVAD, M., KLIGER, I.R. **Modeling slip in stress-laminated timber bridges: Comparison of two finite-element-method approaches and test values.** Journal of Bridge Engineering, 2014.

ENGEL, H. **Sistemas estruturais.** São Paulo: G. Gili, Ltda, 2015

EBELING, E.B. **Análise de Base de Pilares Pré-Moldados na Ligação com Cálice de Fundação.** Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.

FORTINO, S., HRADIL, P., KOSKI, K., KORKEALAAKSO, A., FÜLÖP, L., BURKART, H., TIRKKONEN, T. **Health monitoring of stress-laminated timber bridges assisted by a hygro-thermal model for wood material.** Applied Sciences 11 (1), art. no. 98, pp. 1-21. Switzerland, 2021

FLEMING, P.H., RAMAGE, M.H. **Full-scale construction and testing of stress-laminated columns made with low-grade wood.** Construction and Building Materials, 230, art. no. 116952. 2020

FLEMING, P. H. **Variations in low-grade wood modification and stress lamination: small-scale models and full-scale column construction and testing.** Emmanuel College. April, 2016.

FONTE, T.F. **Pontes protendidas de Eucalipto Citriodora**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

FONTE, T.F; CALIL, C. **PONTES PROTENDIDAS DE MADEIRA: ALTERNATIVA TÉCNICO-ECONÔMICA PARA VIAS RURAIS**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.27, n.2, p.552-559, maio/ago. 2007

GÓES, J. L. N. **Estudo de pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido**. Tese (Doutorado). São Carlos, 2005.

GONÇALVES, R; BARTHOLOMEU, A. **Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de Eucaliptus citriodora e Pinus elliotti**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v4, n2, p.269-274. Campina Grande, PB, 2000.

HU, L.J., CHUI, Y.H. ; ONYSKO, D.M., **Vibration serviceability of timber floors in residential construction**. Prog. Struct. Engng Mater., 3: 228- 237. 2001

-
KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical Properties of Wood**. In: **Wood Handbook - Wood as an engineering material**. Centennial. ed. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. Cap. 5, p. 131-132.

LAUFENBERG, T.L; PALKA, L.C; MCNATT, J. D. **Creep and creep rupture behavior of wood-based structural panels**. USDA. Res. Pap. Fpl-Rp-574, 1987.

LIMA, C. A. P. **Comportamento mecânico com resíduos industriais, sob flexão a quatro pontos, para construção de pavimentos flexíveis**. Dissertação. Universidade federal do Amazonas. 2017

LINDQUIST, M. **Confiabilidade estrutural de pontes laminadas protendidas de madeira**. Tese (Doutorado). Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2006.

MASSARO, F.M., MALO, K.A. **Stress-laminated timber decks in bridges: Friction between lamellas, butt joints and pre-stressing system**. Engineering Structures, 213, art. no. 110592. 2020.

MELLO, R, L. **Projetar em Madeira: uma nova abordagem**. Dissertação (Mestrado) -Curso de Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MELLO, J, E. **Madeira: características e aplicações**. Brasilia:PF/IBAMA, 2002.

MELO, R. R; MENEZZI, C. H. S. **Comportamento reológico da madeira e derivados**. Ciencia da Madeira, Pelotas, v.01, n. 01, p 25-40, Maio de 2010.

MENDES, R. A. B. **Comportamento estrutural de painéis Cross-Laminated Timber sob cargas perpendiculares ao seu plano: abordagem experimental e numérica**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.2020

MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** Esss. 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em 24 de outubro de 2022

MOYAM L; BAÑO, V. **Elastic Behavior of Fast-Growth Uruguayan Pine determined from compression and bending tests**. BioResources. 12(3), 5896-5912, 2017.

MOLINA, J. C. E CALIL JUNIOR, C. **Estratégia para modelagem numérica de sistemas mistos considerando diferentes modelos de ruptura para os materiais.** Revista chilena de ingeniería, v. 17, p. 256-266, 2009.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira.** Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR. 4ª edição: novembro de 2012.

MOURA, J.D.M; PLETZ.E. **Manual de classificação visual de pelas estruturais de madeira tipo Pinus.** Universidade Estadual de Londrina, 2011.

OKIMOTO, F. S. **Pontes protendidas de madeira: parâmetros de projeto.** Dissertação (Mestrado). São Carlos, 1997.

OKIMOTO, F. S. **Análise da perda de protensão em pontes protendidas de madeira.** Tese (Doutorado) São Carlos, 2001

OLIVA, M.G., RITTER, M.A. & DIMAKIS, A.G. (1988). **Stress Laminated Timber Deck Bridges: Prototype Project. Proceedings of the “1988 International Conference on Timber Engineering”.** Washington D.C. p. 645- 649, Setembro 1988.

PEREIRA, M. C. M; CALIL J. C. **Resistência de ligações cavilhadas aplicando a revisão do método de ensaio de ligações mecânicas em estruturas de madeira.** Engenharia industrial madeireira: tecnologia, pesquisa e tendências.. P. 330-342. 2020

PFEIL, W. **Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte-americana NDSe europeia EUROCODE 5.** 6.ed., rev. e ampl. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro : LTC, 2003.

PLANTAR FLORESTAS. **Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas**

Plantadas. Brasília. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/outras-publicacoesplano-nacional-de-desenvolvimento-de-florestas-plantadas.pdf>. Acesso em: 02 de novembro de 2021

PRATA, D. G. **Pontes Protendidas de Madeira.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995

PLETZ, E. **Passarela estaiada com tabuleiro de madeira laminada protendida em módulos curvos.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003

Ramage, M.H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D.U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P, Densley-Tingley, D. **The wood from the trees: the use of timber in construction.** *Renew. Sustain. Energy* 2017. Rev. 68, 333–359.

RECCO, E. G. **Análise experimental do sistema de cobertura caibro treliçado em MLP (madeira laminada pregada) utilizando madeira serrada de Pinus spp.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2015.

RITTER, M. A. **Timber Bridges: design, construction, inspection, and maintenance.** Washington: United States Department of Agriculture Forest Service, 1990.

RODRIGUES, N. A. R. **Avaliação do Sistema Wood Frame em HIS Plurifamiliareis no Paraná.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Maringá, 2021.

SILVA DO CARMO DP, ENGLUND K, LI H. **Pressure prediction model in cross laminated timber manufacturing for low-quality lumber.** *Journal of Composite Materials.* 2022;56(27):4143-4160

SOIKKELI, A.; ILGIN, H.E.; **Karjalainen, M. Wooden Additional Floor in Finland.** *Encyclopedia* 2022, 2,578-592.

SORIANO, J. PELLIS, B. P.; MASCIA, N. T. **Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars.** *Composite Structures*, v. 150, p. 200–207, 2016.

Sotayo, A; Bradle, D.; Bather, M; Sareh, P; Oudjene, M; El-Houjeyri, I; M.; Mehra, S ; O'Ceallaigh, Conan; Haller, P; Namari, S ; Makradi, A; Belouettar, S; Bouhala, L; Deneufbourg, F; Guan,Z. **Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications, Developments in the Built Environment**,Volume 1. 2020.

TAYLOR, R.J.; CSAGOLY, P.F. 1979. **Transverse post-tensioning of longitudinally laminated timber bridge decks.** Downsview, ON, Can.: Ministry of Transportation and Communications. 16 p

United Nations Environment Programme. 2020 **Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.** Nairobi. 2020.

VELOSO, L.; DE SOUZA, R; SAMPAIO, R; AMADOR, S. **Análise de Conforto de Pisos de Madeira do Prédio Histórico Lauro Sodré.** Proceedings of the XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Belém, Para- Brasil. 2006.

WANG, L.; TOPPINEN, A.; JUSLIN, H. **Use of wood in green building: a study of expert perspectives from the UK: a study of expert perspectives from the UK.** *Journal of Cleaner Production*, v. 65, p. 350- 361, 2014.