AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E ANALÍTICA DE VIGA I EM MADEIRA LAMINADA COLADA PARA APLICAÇÃO RESIDENCIAL

Daniel Thomaz Farina[1], José Maria de Moura Junior[2], Maria Eduarda da Silva Dembogurski[3], Victor Mateus Battisti[4], Alfredo Petrauski[5]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS (danielfarina31@gmail.com)
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS (jmmj@poli.br)
3 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS (mariae.dembogurski@gmail.com)
[4] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR (victorbattisti41@gmail.com)
[5] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR (petrauski@terra.com.br)

Resumo: Este estudo avalia o desempenho de uma viga perfil I (4m) de madeira laminada colada (*Pinus sp*. e adesivo de mamona) com emendas de topo não resistentes. A metodologia englobou o dimensionamento analítico e o ensaio prático de flexão. A rigidez experimental superou a previsão teórica em 17% no Estado Limite de Serviço. Contudo, a ausência de ligações *finger-joint* gerou um aumento de 42% no volume de madeira. Conclui-se que o sistema é tecnicamente viável e seguro para uso residencial.

Palavras-chave: Dimensionamento estrutural; Madeira laminada colada; Perfil I; *Pinus sp*.; Rigidez flexional.

INTRODUÇÃO

A madeira destaca-se como um material de excelência para a construção civil, caracterizando-se pela sua elevada resistência mecânica, baixo peso específico e origem renovável (Santana, 2009). Apesar destas vantagens, a sua utilização, especialmente no contexto sul-americano, é frequentemente associada a obras provisórias devido ao uso inadequado do material e das técnicas construtivas, prevalecendo a hegemonia das construções em alvenaria (Laroca, 2002).

Para superar estas limitações, a tecnologia da Madeira Laminada Colada (MLC) surge como uma solução eficaz, consistindo na colagem de lâminas com adesivos para formar peças de dimensões superiores e com menos defeitos em comparação com a madeira maciça (Jesus, 2000). Por conseguinte, a MLC não só otimiza o uso da matéria-prima, como também amplia as possibilidades arquitetônicas e estruturais na construção moderna.

Nesse panorama, a utilização de espécies de rápido crescimento provenientes de florestas plantadas, com especial destaque para o gênero *Pinus sp*., consolida-se como uma alternativa viável para suprir a demanda industrial e reduzir a pressão sobre as florestas nativas (Santana, 2009). Contudo, a presença frequente de nós, desvios de fibra e heterogeneidade de densidade nestas madeiras exige o seu processamento na forma de lamelas coladas, técnica que redistribui os defeitos e confere maior homogeneidade e confiabilidade ao material final.

A eficiência da MLC é maximizada através do emprego de seções transversais otimizadas, como é o caso dos perfis em "I", e da seleção criteriosa de adesivos estruturais. De acordo com Santos (2008) e Bischoff (2013), nas vigas com seção em "I", a alma assume a responsabilidade pela absorção das tensões tangenciais, enquanto as mesas resistem à maior parte das tensões normais, o que permite uma notável economia de material sem comprometer o desempenho estrutural.

Adicionalmente, a confiabilidade desta composição depende do adesivo utilizado, destacando-se as resinas poliuretanas à base de óleos vegetais devido às suas propriedades mecânicas e sustentabilidade (Jesus, 2000). A normalização vigente orienta que a colagem deve ser realizada com as fibras paralelas ao eixo longitudinal, garantindo a coesão necessária para suportar os esforços exigidos (Duarte, 2004; Nogueira, 2017). Assim, a combinação de seções eficientes com adesivos adequados resulta em elementos estruturais previsíveis e seguros.

No contexto da investigação laboratorial e da prática construtiva para habitações sociais ou comerciais, a execução de estruturas em madeira de grande porte enfrenta frequentemente limitações tecnológicas, como a indisponibilidade de equipamentos para a realização de ligações dentadas padronizadas do tipo

finger-joint. Diante desse contexto, torna-se necessário avaliar a viabilidade do uso de emendas de topo simples, consideradas não resistentes no dimensionamento normativo, na concepção de elementos estruturais pré-fabricados de escala real.

Esta abordagem fundamenta-se no fato de as diretrizes normativas nacionais vigentes (como a ABNT NBR 7190-1:2022) adotarem critérios conservadores para o dimensionamento de elementos com descontinuidades longitudinais, desconsiderando a contribuição mecânica de seções com emendas de topo simples. Torna-se, portanto, imperativo investigar até que ponto esse rigor reflete o comportamento de transição de tensões na linha de cola e o deslocamento real do componente sob condições de serviço.

Com base nesta premissa, o objetivo central deste trabalho consiste em projetar e avaliar o desempenho estrutural, focando-se na rigidez e nas deformações, de uma viga de madeira laminada colada com seção em "I" (com vão total de 4 metros), construída com tábuas de *Pinus sp.* e adesivo de base vegetal, dimensionada especificamente para suportar os carregamentos típicos de uma residência.

MATERIAL E MÉTODOS

Preparação e caracterização física

A seleção da matéria-prima baseou-se na utilização de tábuas da espécie *Pinus sp*. com dimensões nominais de 3,00 m de comprimento, 20 cm de largura e 2,5 cm de espessura. O lote de madeira passou por uma triagem visual com o propósito de descartar peças que apresentassem nós de grandes dimensões, bolsas de resina ou empenamentos acentuados que pudessem comprometer a homogeneidade das propriedades mecânicas. O material foi submetido ao processo de secagem natural em ambiente controlado até atingir o teor de umidade de equilíbrio próximo a 12%, conforme preconizado pela ABNT NBR 7190-1:2022.

Após a estabilização higroscópica, determinou-se a massa específica aparente de cada tábua, bem como o módulo de elasticidade longitudinal médio à compressão paralela às fibras ($E_{c0,m}$), estabelecido em 14.500 MPa (147.858 kgf/cm^2) através de ensaios em corpos de prova testemunhas. Essa caracterização prévia permitiu classificar e direcionar as peças mais rígidas e densas especificamente para as regiões da viga sujeitas a maiores concentrações de tensões.

Sistema adesivo e processo de colagem

A união solidária das lâminas para a conformação do perfil estrutural foi realizada utilizando um adesivo poliuretano bicomponente formulado à base de óleo de mamona. A escolha deste adesivo justifica-se por ser um composto derivado de fonte renovável, com cura fria e livre de emissão de componentes orgânicos voláteis, alinhando-se aos preceitos de sustentabilidade na construção civil (Jesus, 2000).

Os componentes poliol e pré-polímero foram homogeneizados na proporção recomendada pelo fabricante e aplicados uniformemente nas faces das tábuas previamente aplainadas, predefinindo uma gramatura controlada de adesivo por metro quadrado. A consolidação do conjunto lamelar ocorreu sob prensagem mecânica uniforme com pressão constante de aproximadamente 0,7 MPa, mantida por um período mínimo de 24 horas para garantir a polimerização completa da resina e a formação de uma linha de cola de alta aderência, conforme documentado na Figura 1.



Figura 1. Processo de consolidação e prensagem mecânica da viga

Concepção geométrica e distribuição de emendas

A viga foi projetada com uma seção transversal em perfil "I" otimizado, visando maximizar o momento de inércia e reduzir o consumo volumétrico de madeira. As mesas superior e inferior foram compostas pelo travamento de tábuas paralelas, enquanto a alma foi estruturada verticalmente para resistir aos esforços cortantes.

Diante da impossibilidade de execução de juntas do tipo *finger-joint*, adotaram-se emendas de topo simples para viabilizar o comprimento total do elemento estrutural. Essas emendas foram distribuídas de forma defasada ao longo do comprimento da viga, respeitando uma distância longitudinal mínima de 25 vezes a espessura da lâmina entre emendas de camadas adjacentes, evitando a criação de planos frágeis coincidentes. A geometria final obtida e as dimensões nominais do perfil construído estão indicadas na Figura 2.



Figura 2. Seção da viga confeccionada.

Critérios de dimensionamento e ações consideradas

O dimensionamento analítico do elemento estrutural fundamentou-se nos critérios do método dos estados limites, seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 7190-1:2022. Para o cálculo das propriedades geométricas da seção transversal, utilizou-se o método da seção transformada, penalizando o modelo ao subtrair a área correspondente às emendas de topo nas seções onde estas ocorriam, tratando-as de forma conservadora como vazios não resistentes.

No cálculo das ações permanentes, adotou-se, conforme a ABNT NBR 6120:2019, uma massa específica de projeto de 875 kgf/m^3 para o peso próprio da viga; essa premissa visa garantir uma margem de segurança conservadora frente a possíveis acúmulos de adesivo e variações de umidade em serviço, sobrepondo-se aos valores reais medidos em laboratório. As equações fundamentais empregadas para a verificação das tensões normais máximas de flexão (σ), tensões tangenciais de cisalhamento (τ) e deflexão teórica no centro do vão (δ) sob o arranjo de cargas concentradas simétricas são expressas por:

(1) $$\sigma = \frac{M_d \cdot y}{I_{tr}}$$

(2) $$\tau = \frac{V_d \cdot M_{e,tr}}{b \cdot I_{tr}}$$

(3) $$\delta = \frac{P \cdot a}{24 \cdot E_{c0,m} \cdot I_{tr}} \cdot (3L^2 - 4a^2)$$

Em que "M_d" é o momento fletor de cálculo, "V_d" é o esforço cortante de cálculo, "I_{tr}" representa o momento de inércia da seção transformada, "$M_{e,tr}$" denota o momento estático da seção transformada, b é a largura da alma, "P" representa a carga aplicada por cada cilindro atuador, "L" corresponde ao vão livre e "a" equivale à distância do apoio ao ponto de aplicação da primeira carga concentrada. A composição final das ações nominais e os coeficientes de ponderação adotados encontram-se sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1. Considerações de cargas para projeto.

Tipo de carga	ρ		Cargas depositadas na viga (kgf)	
	(kgf/m^3)	(kgf/m^2)	(kgf)	(kgf/m)
Lajota de EPS L12	-	150	2580	600
Parede acima da viga de alvenaria	1500	-	2709	630
Parede acima da viga de drywall	-	50	602	140
Peso próprio (C30-40)	875	-	180,6	42
Piso (Sucupira ou Jatobá)	950	-	326,8	76
Ocupação (dormitório)	-	150	2580	600
Revest. laje e adicionais	-	38	653,6	152
Contrapiso	-	50	860	200

Instrumentação e protocolo do ensaio experimental

A validação do comportamento mecânico real da viga foi conduzida por meio de um ensaio de flexão estática de escala real executado sobre uma base rígida de reações. O elemento estrutural foi posicionado de forma biapoiada, estabelecendo um vão livre de ensaio de 4,00 metros e um comprimento total de 4,30 metros com balanços terminais de 15 centímetros em cada extremidade. O sistema de aplicação de carga utilizou atuadores hidráulicos calibrados conectados a células de carga, aplicando forças concentradas em pontos estratégicos do vão para simular uma linha de pressões equivalente a uma carga uniformemente distribuída.

A instrumentação consistiu na instalação de cinco relógios comparadores com resolução de 0,01 mm, fixados magneticamente sob a mesa inferior e sobre a mesa comprimida para registrar de forma contínua as flechas máximas centrais e os deslocamentos simétricos laterais. O arranjo experimental concebido e a sua montagem física no laboratório estão ilustrados respectivamente na Figura 3 e na Figura 4.

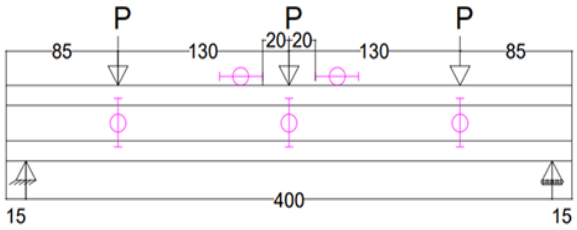


Figura 3. Esquema do posicionamento dos relógios.



Figura 4. Posicionamento *in loco* dos relógios.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização física das lâminas de *Pinus sp.* determinou a adequação do lote para a conformação do elemento estrutural. O monitoramento contínuo da secagem atestou a estabilização da umidade média em 12,95% no momento da colagem, aproximando-se do referencial de 12% estipulado pela ABNT NBR 7190-1:2022. A triagem das peças por massa específica revelou uma densidade média de 590,39 kg/m^3 para as tábuas de 15 cm de largura, destinadas às mesas, e 622,98 kg/m^3 para as de 20 cm. A seleção das tábuas mais densas (669,06 kg/m^3) especificamente para compor a alma da viga otimizou a capacidade do elemento de absorver tensões tangenciais. Consequentemente, a distribuição das lâminas, baseada em suas propriedades físicas intrínsecas, maximizou a eficiência mecânica inicial da seção transversal, conforme segue na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades físicas médias do lote de madeira *Pinus sp*.

Elemento da viga	Largura da tábua	Umidade média	Densidade média
	(cm)	(%)	(kg/m^3)
Mesas (superior e inferior)	15	12,95	590,39
Mesas (superior e inferior)	20	12,95	622,98
Alma (peças selecionadas)	20	12,95	669,06

A fase de acomodação estrutural validou a integridade das conexões adesivas e a linearidade elástica do sistema. A execução de dois ciclos prévios de carregamento até um terço da carga de projeto dissipou as tensões iniciais de montagem e não gerou deformações residuais mensuráveis no elemento. Durante a execução do carregamento principal, o monitoramento por meio de cinco relógios comparadores confirmou a simetria na distribuição dos esforços, visto que os instrumentos posicionados na face superior e inferior em lados opostos e equidistantes do centro apresentaram deslocamentos análogos sob as mesmas intensidades de carga. Esta resposta mecânica comprova que o arranjo lamelar simétrico e as emendas de topo transferiram os esforços de maneira contínua, garantindo a estabilidade global do sistema. A progressão linear das deformações em função do incremento do carregamento pode ser observada na Figura 5.

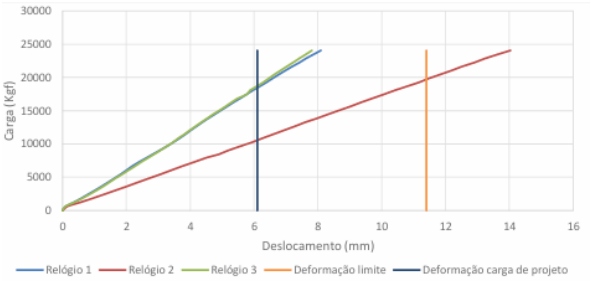


Figura 5. Gráfico Carga x Deformação.

O dimensionamento analítico atendeu aos critérios de segurança do Estado Limite Último, mesmo contabilizando a perda teórica de inércia proveniente das juntas não resistentes. A análise da seção crítica demonstrou que a tensão normal máxima de cálculo atuante (104,66 kgf/cm^2) se manteve abaixo do limite resistente à compressão paralela às fibras estabelecido para a madeira (130,64 kgf/cm^2), garantindo uma margem de segurança para a flexão.

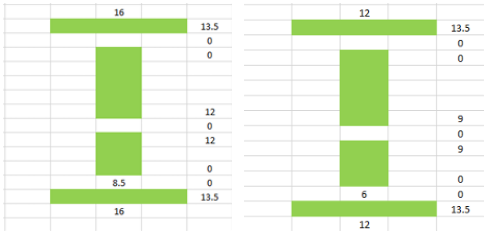
Paralelamente, as tensões tangenciais máximas de cálculo geradas pelo esforço cortante (22,88 kgf/cm^2) também não ultrapassaram a capacidade resistente ao cisalhamento da seção transversal (27,08 kgf/cm^2). O modelo analítico simplificado, que considerou as emendas como espaços vazios, mostrou-se matematicamente eficiente para dimensionar uma seção capaz de manter os esforços internos dentro das margens normativas de segurança, impedindo o colapso prematuro da estrutura sob as cargas de projeto. A verificação do Estado Limite Último na seção mais crítica é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Verificação analítica das tensões máximas na seção crítica.

Esforço verificado	Tensão de cálculo atuante (kgf/ cm^2)	Tensão de cálculo resistente (kgf/ cm^2)	Situação
Tensão normal (momento fletor)	104,66	130,64	Atende
Tensão tangencial (cisalhamento)	22,88	27,08	Atende

A rigidez à flexão do elemento estrutural superou de forma substancial as previsões teóricas estipuladas no projeto analítico. A flecha máxima de 0,61 cm no centro do vão, prevista teoricamente para a carga de serviço de 9.300 kgf através da formulação elástica linear da seção transformada, foi registrada experimentalmente apenas sob uma solicitação mecânica de 10.879,5 kgf, configurando um ganho real de 17% na rigidez global para o mesmo nível de deformação. Adicionalmente, avaliou-se o comportamento do componente sob o limite de deslocamento de L/350 (correspondente a 1,14 cm); embora a norma ABNT NBR 7190-1:2022 estipule o critério geral de L/300 para o limite visual de pisos, optou-se pela restrição mais severa de L/350 para simular o suporte a revestimentos frágeis e evitar danos estéticos severos em elementos arquitetônicos adjacentes. Esta meta restritiva foi atingida sob um carregamento de 19.251 kgf, superando em 107% os esforços esperados para a ocupação residencial da laje, o que atesta a segurança do perfil contra estados limites de serviço.

A análise crítica do consumo de materiais expõe a ineficiência atrelada à limitação tecnológica na execução das emendas longitudinais. A necessidade de considerar as emendas de topo como seções efetivamente vazias no cálculo exigiu um aumento geométrico da seção transversal, demandando o consumo total de 0,27 m^3 de madeira (Figura 6a). A utilização de uniões estruturais contínuas e resistentes à tração, como o sistema *finger-joint*, reduziria a demanda volumétrica limitante para apenas 0,19 m^3 (Figura 6b), suportando com segurança os mesmos esforços flexionais. A indisponibilidade de juntas longitudinais de alto desempenho gera um superdimensionamento de 42% no volume de madeira, evidenciando que a viabilidade econômica e sustentável da produção de vigas I de MLC em escala industrial depende da implementação de tecnologias de colagem de topo eficientes.



(a) (b)

Figura 6. Comparativo entre (a) a seção transversal executada com emendas não resistentes e (b) a seção teórica otimizada.

Apesar dos resultados favoráveis, é necessário destacar a limitação estatística deste estudo, decorrente do ensaio de um único exemplar estrutural em escala real. A ausência de uma amostragem maior impede a determinação da variabilidade estatística dos deslocamentos e das tensões de ruptura, tornando os resultados representativos especificamente para as propriedades deste protótipo e do lote selecionado.

CONCLUSÃO

A investigação experimental e analítica validou a viabilidade técnica da viga em perfil "I" desenvolvida com lamelas de *Pinus sp*. e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona para aplicações residenciais. Os ensaios comprovaram um comportamento puramente elástico-linear sob cargas de serviço, apresentando uma rigidez flexional 17% superior à previsão teórica e deslocamentos verticais significativamente abaixo dos limites do Estado Limite de Serviço. Ademais, a verificação analítica do Estado Limite Último confirmou a segurança contra a ruptura por flexão e cisalhamento, demonstrando que a triagem e distribuição estratégica de lamelas de maior massa específica na alma do perfil otimizou a absorção das tensões tangenciais e garantiu a estabilidade global do elemento. Assim, confirma-se o potencial desta composição sustentável para uso em componentes estruturais de baixo impacto ambiental.

Em contrapartida, o estudo evidenciou o impacto que as limitações tecnológicas na execução de ligações longitudinais exercem sobre a eficiência de consumo dos recursos florestais. A necessidade de adotar emendas de topo simples, penalizadas de forma conservadora no modelo analítico como seções efetivamente vazias e não resistentes, resultou na necessidade de aumentar em 42% o volume de madeira para compensar a perda teórica de inércia do perfil. Consequentemente, embora este arranjo simplificado constitua uma alternativa segura e exequível para indústrias locais de pequena escala ou cenários de autoconstrução, a viabilidade econômica e a competitividade comercial deste sistema em larga

escala dependem criticamente da introdução de juntas coladas de alto desempenho.

Por fim, este trabalho estabelece um referencial prático para o desenvolvimento de madeiras engenheiradas de matriz renovável, abrindo caminho para investigações complementares que consolidem a sua aplicação normativa. Para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação do comportamento a longo prazo deste sistema sob carregamentos sustentados, visando determinar os efeitos da fluência na linha de cola vegetal e na estabilidade das emendas. Sugere-se ainda o desenvolvimento de modelos numéricos tridimensionais via elementos finitos para refinar a análise do fluxo de tensões tangenciais nas proximidades das descontinuidades de topo, otimizando os critérios de dimensionamento atuais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo indispensável apoio financeiro concedido por meio de bolsa de doutorado. Esse fomento institucional garantiu a dedicação necessária para a execução das etapas metodológicas e para o desenvolvimento integral da investigação científica. Consequentemente, o suporte provido pela agência viabilizou a conclusão do estudo e a consolidação dos resultados aqui apresentados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190-1: **Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BISCHOFF, T. T. **Avaliação de vigas I de madeira compostas e com variação de inércia**. 2013. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

DUARTE, R. S.; CARRASCO, E. V. M. **Avaliação do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em vigas de MLC**. 2004. 248 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC).** 2000. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

LAROCA, C. **Habitação social em madeira: uma alternativa viável.** 2002. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

NOGUEIRA, F. N. **Estudo de painéis lamelados colados cruzados de madeira Pinus taeda L. submetidos a esforços de flexão.** 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético.** 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SANTOS, A. M. L. **Avaliação teórica e experimental de vigas em "I" pré-fabricadas de madeira com flanges de painéis de lâminas paralelas (LVL) e almas de painéis de partículas orientadas (OSB).** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.