ANÁLISE DE TENSÕES E EFICIÊNCIA DE CISALHAMENTO EM VIGA PERFIL I DE MADEIRA LAMINADA COLADA COM ADESIVO DE MAMONA

José Maria de Moura[1], Daniel Thomaz Farina[2], José Maria de Moura Junior[3], Maria Eduarda da Silva Dembogurski[4], Murilo Barbosa Ulanovicz[5], Alfredo Petrauski[6]

[1]Universidade Norte do Paraná, Picos/PI
(zemariasertaogas@hotmail.com)
[2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS
(danielfarina31@gmail.com)
[3] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS
(jmmj@poli.br)
[4] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS
(mariae.dembogurski@gmail.com)
[5] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR
(murilo_2902@hotmail.com)
[6] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR
(petrauski@terra.com.br)

Resumo: A presente pesquisa avalia e comprova a eficiência ao cisalhamento do adesivo de mamona e a segurança elástica de viga perfil I em madeira laminada colada (*Pinus sp.*). A metodologia englobou ensaios de cisalhamento e flexão estática instrumentada. Os resultados revelaram que a junta (114,27 kgf/cm²) superou a madeira sólida (90,17 kgf/cm²). Sob 24 toneladas, a viga operou a 55% de sua tensão limite. Conclui-se que o sistema é viável e exige rigoroso controle fabril.

Palavras-chave: Adesivo de Mamona; Cisalhamento; Flexão Estática; Madeira Laminada Colada; Perfil I.

INTRODUÇÃO

A madeira é um material sustentável cujo aproveitamento estrutural tem sido impulsionado pelo desenvolvimento da técnica de Madeira Laminada Colada (MLC). A produção de MLC viabiliza o uso racional de espécies de reflorestamento, possibilita a superação das limitações dimensionais da madeira serrada e dispersa defeitos naturais, resultando em peças mais homogêneas com elevadas resistência e rigidez (Miotto e Dias, 2009).

Uma das principais vantagens desse sistema é a liberdade geométrica para a formação da seção transversal, o que viabiliza a adoção de perfis estruturalmente otimizados, como a seção I. Esse formato reduz significativamente o peso próprio da peça ao concentrar a massa nas regiões das mesas, maximizando o momento de inércia e o aproveitamento do material frente aos esforços de flexão (Silva, 2010). Contudo, o sucesso mecânico dessa otimização exige que a ligação entre a alma e as mesas resista aos esforços cortantes, demandando uma união monolítica rigorosa capaz de suportar intensas tensões de cisalhamento.

Ademais, a madeira apresenta um comportamento anisotrópico, sendo a resistência ao cisalhamento gerado por tensões tangenciais paralelas às fibras a sua condição mais desfavorável e vulnerável ao deslizamento (Correia, 2009).

Como a alma de um perfil I concentra as maiores tensões de corte sob flexão, as superfícies coladas nesta região atuam diretamente para combater essa fragilidade natural. Consequentemente, a adoção da técnica de MLC exige um controle rigoroso do processo de fabricação (englobando a umidade das lâminas, o espalhamento do adesivo e a pressão de prensagem), atingindo um nível de exigência técnica análogo ao da indústria de pré-fabricação de concreto (Miotto e Dias, 2009), a fim de assegurar que a linha de cola não se torne um plano de ruptura horizontal.

Para garantir essa união adequada e a transferência de tensões nas estruturas de MLC, o emprego de adesivos de alto desempenho é necessário. O crescimento da aplicação de MLC esteve diretamente associado ao surgimento de adesivos comerciais à base de resinas sintéticas, os quais oferecem alta resistência ao cisalhamento e estabilidade frente às variações de umidade (Moreira, 2004). Contudo,

visando minimizar a dependência de produtos sintéticos importados e reduzir custos, a tecnologia de adesivos alternativos e de fonte renovável tem ganhado destaque no Brasil.

O desenvolvimento do adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona apresenta-se como uma solução técnica promissora para o uso estrutural (Couri Petrauski, 2012). Para que este componente nacional seja validado em vigas de grande porte, é fundamental que a sua união físico-química proporcione uma resistência ao cisalhamento equivalente ou superior à da própria madeira sólida, garantindo que o plano de cola não atue como o elo fraco da estrutura sob as solicitações tangenciais.

Apesar do forte potencial mecânico e sustentável da junção entre perfis em I e o poliuretano vegetal, há uma necessidade de comprovação experimental do comportamento deste sistema construtivo sob condições limites de serviço e de capacidade portante. O dimensionamento seguro de estruturas de madeira exige a verificação das margens de segurança do conjunto, mensurando as tensões normais desenvolvidas na fibra mais solicitada.

Diante deste contexto, o objetivo central deste trabalho é avaliar a eficiência e a confiabilidade estrutural de uma viga perfil I em madeira laminada colada (*Pinus sp.*), executada com adesivo poliuretano à base de mamona. O estudo foca, em atestar a resistência ao cisalhamento da junta colada em relação à madeira sólida e em mapear as tensões de compressão na fibra extrema para determinar a margem de segurança da estrutura operando no regime elástico sob esforços extremos de flexão.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da madeira sólida e do adesivo

A etapa preliminar da pesquisa consistiu na seleção dos insumos e na caracterização mecânica de referência da madeira. Utilizou-se um lote comercial de madeira de reflorestamento da espécie *Pinus sp.*, com tábuas de 2,5 cm de espessura e densidades variando entre 390 kg/m³ e 880 kg/m³.

Para o sistema de colagem, adotou-se um adesivo poliuretano bicomponente de fonte renovável formulado à base de óleo de mamona, preparado na proporção mássica de 1:1,5 (isocianato:poliol) e aplicado sob um consumo padronizado de 300 g/m².

A caracterização das propriedades da madeira sólida seguiu as premissas da ABNT NBR 7190-1:2022, realizando-se ensaios de compressão paralela às fibras (f_{c0}) em 13 corpos de prova para a obtenção do módulo de elasticidade médio ($E_{c0,m}$) e da resistência característica à compressão (f_{c0k}).

Uma vez que o teor de umidade influencia diretamente no desempenho mecânico da madeira, os corpos de prova tiveram sua umidade aferida no momento do rompimento (apresentando médias entre 11,18% e 11,58%). Todos os valores brutos de resistência e rigidez foram corrigidos para o teor de umidade padrão de referência (12%).

A definição destes parâmetros mecânicos serviu como base para o cálculo analítico das tensões, permitindo a posterior avaliação do comportamento elástico da viga em escala real.

Ensaio de cisalhamento da linha de cola

O ensaio de cisalhamento longitudinal foi estruturado para avaliar a eficiência mecânica da união colada sob tensões tangenciais, contrastando-a com o comportamento resistente da própria madeira sólida. A caracterização do cisalhamento paralelo às fibras da madeira maciça seguiu as diretrizes da ABNT NBR 7190-1:2022, envolvendo a confecção e o rompimento de 16 corpos de prova, mantidos sob pressão mínima de fixação por 12 horas antes do ensaio. Por sua vez, a avaliação das juntas coladas seguiu os preceitos da norma internacional ASTM D905-08 (2021), utilizando 32 amostras com o plano de cola centralizado com o adesivo de mamona.

As juntas coladas foram submetidas a uma pressão de prensagem de 7 kgf/cm². Para garantir a exatidão, o torque de aperto foi controlado por um torquímetro digital calibrado em laboratório via célula de carga e sistema de aquisição de dados, estabelecendo-se uma equação de regressão linear (R^2 = 0,98) que correlacionou a deformação do extensômetro da chave com a carga real de prensagem aplicada sobre o sistema de fixação. A cura ocorreu por sete dias.

O ensaio destrutivo forneceu a máxima força cortante suportada por cada amostra antes da ruptura, gerando os valores de resistência ao cisalhamento (f_{v0}) corrigidos estatisticamente para a umidade de referência (12%). Esta confrontação de resistências ao corte atesta se a falha por cisalhamento ocorrerá primeiro nas fibras da madeira ou na própria interface da cola, o que é o principal indicador de confiabilidade do adesivo para o emprego estrutural em vigas laminadas. A Figura 1 apresenta a configuração geométrica do corpo de prova, enquanto a Figura 2 o aparato de corte para ensaio de resistência ao cisalhamento.

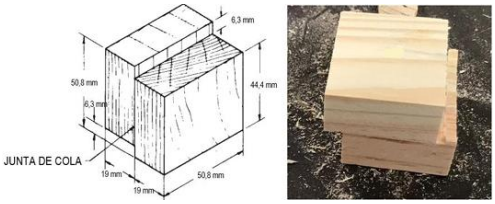

Figura 1. Dimensões dos corpos de prova.

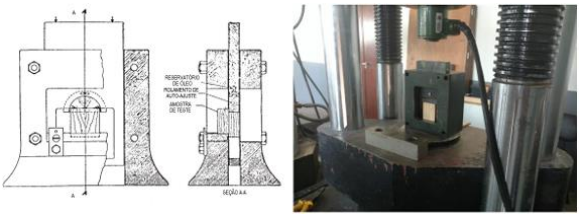

Figura 2. Aparato de corte para ensaio de resistência ao cisalhamento.

Concepção da viga e instrumentação do ensaio de flexão

A etapa final compreendeu a execução e o ensaio de flexão estática sob carregamento progressivo de uma viga de MLC concebida em seção transversal com perfil I, submetida a esforços crescentes de flexão estática para o mapeamento *in loco* do campo de tensões normais extremas.

A estrutura, dimensionada com um comprimento total de 4,3 metros em vinculação biapoiada, possuía mesas superior e inferior medindo 16 cm x 13,5 cm. A alma central apresentava uma seção composta por lâminas de madeira justapostas e coladas longitudinalmente com espessuras nominais de 2,0 cm, totalizando uma espessura final homogeneizada de 8,2 cm por 24 cm de altura.

A execução do perfil I demandou um processo em quatro etapas consecutivas de colagem: (1) mesa superior, (2) mesa inferior, (3) alma central e, por fim, (4) a união do conjunto. Nas etapas iniciais, as superfícies de contato foram submetidas a preparo mecânico em máquina desengrossadeira para remoção de resíduos de adesivo endurecido e garantia de planicidade.

Contudo, devido à limitação da altura útil da desengrossadeira disponível para processar o perfil montado, a preparação da superfície da alma para a colagem final contra as mesas teve de ser executada manualmente com o auxílio de lixas. Embora o lixamento manual seja considerado uma limitação metodológica por comprometer a uniformidade de textura necessária à colagem estrutural, o procedimento foi indispensável para viabilizar a montagem do perfil.

Devido à instabilidade causada pela prensagem de componentes esbeltos, a colagem longitudinal demandou o desenvolvimento de um gabarito de prensagem específico. Durante a montagem da alma, aplicaram-se contenções laterais mecânicas para impedir o deslizamento transversal das lâminas lubrificadas pelo adesivo sob pressão. A Figura 3 demonstra a situação a seguir.

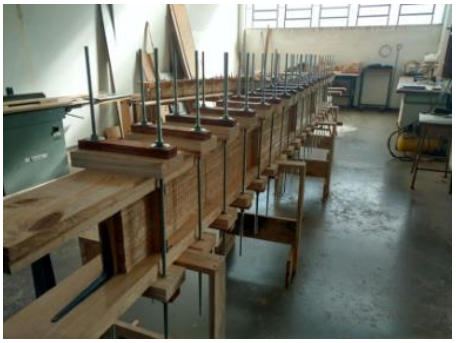

Figura 3. Prensagem da ala da viga.

Adicionalmente, a fixação ortogonal da alma contra as mesas superior e inferior exigiu a instalação de perfis metálicos atuando como guias de alinhamento, etapa construtiva para assegurar a coesão do plano de cola e viabilizar a correta transferência das tensões de cisalhamento operantes na seção final. A Figura 4 apresenta as cantoneiras utilizadas como guias de alinhamento ortogonal na junção com as mesas.

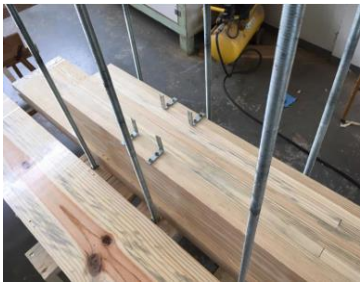

Figura 4. Conjunto de cantoneiras instaladas para confinamento da alma.

O sistema de carregamento consistiu em dois cilindros hidráulicos posicionados simetricamente, a 130 cm de cada lado do centro do vão (ensaio a 4 pontos), com a medição das forças atuantes efetuada instantaneamente por células de carga acopladas ao pórtico de reação.

Para viabilizar a análise rigorosa das tensões operantes no regime elástico, o centro do vão no bordo superior da viga (região das máximas fibras comprimidas) foi instrumentado com dois relógios comparadores com resolução de milésimo de milímetro, encarregados de registrar a deformação específica longitudinal (ε) do material a cada incremento de 600 kgf.

A aplicação da Lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \varepsilon$), com o módulo de elasticidade ($E_{c0,m}$) real do lote de madeira, promove a conversão destas deformações em tensões atuantes, demonstrando a exata margem de segurança e a reserva de resistência suportada pelo perfil projetado. A Figura 5, a seguir, apresenta o esquema estático do ensaio de flexão da viga perfil I, evidenciando o vão biapoiado, o distanciamento dos

apoios e o posicionamento exato das cargas verticais via pistões hidráulicos.

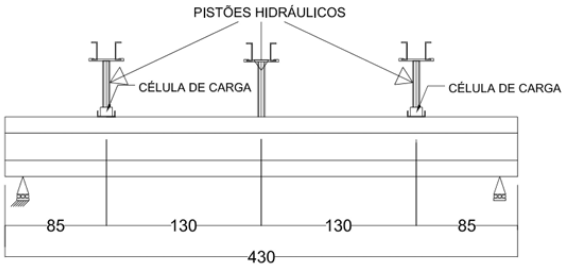

Figura 5. Esquema estático do ensaio de flexão da viga perfil I.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Eficiência da junta colada ao cisalhamento

A avaliação mecânica do cisalhamento longitudinal revelou que a união físico-química proporcionada pelo adesivo de mamona superou a resistência intrínseca da própria madeira.

A análise comparativa dos ensaios destrutivos demonstrou que a madeira maciça de *Pinus sp*. apresentou uma resistência característica ao cisalhamento de 90,17 kgf/cm² (média de 111,88 kgf/cm²), enquanto o plano de cola suportou tensões tangenciais significativamente maiores, atingindo um f_{v0k} global de 114,27 kgf/cm² (média de 136,55 kgf/cm²). Cabe destacar que a amostra ensaiada apresentou considerável variabilidade anatômica, dividida entre corpos de prova de menor densidade (Grupo 1) e de maior densidade (Grupo 2).

Nas juntas coladas do Grupo 2, a resistência média atingiu 158,54 kgf/cm², superando a média de 114,57 kgf/cm² registrada no Grupo 1. A verificação de que a junta colada manteve um desempenho satisfatório em ambas as faixas evidencia a capacidade de ancoragem do poliuretano vegetal, e isso independente da porosidade da peça.

Este resultado empírico atesta que, sob esforços extremos de corte, a falha estrutural ocorrerá pelo rompimento natural das fibras da madeira e não pela delaminação da junta, garantindo o monolitismo exigido para a transferência de tensões horizontais no perfil I. Os parâmetros resistivos estão na Tabela 1.

Tabela 1. Resistência média e característica ao cisalhamento da madeira maciça e das juntas coladas por grupos de densidade.

Material/Grupo	Densid. aparente	Resist. média ($f_{v0,m}$) [kgf/cm²]	Resist. característica ($f_{v0,m}$) [kgf/cm²]
Madeira Sólida (*Pinus sp.*)	Global	111,88	90,17
Junta colada (grupo 1)	Baixa / Média	114,57	-
Junta colada (grupo 2)	Alta	158,54	-
Interface colada global	Amostra total	136,55	114,27

* O valor da interface colada global refere-se à média ponderada obtida a partir dos 32 cps rompidos, justificando a variação em relação à média aritmética dos grupos.

Mapeamento de tensões sob flexão extrema

O ensaio de flexão instrumentado possibilitou o mapeamento da evolução das tensões normais na fibra mais solicitada da viga (bordo da mesa superior) sob carregamentos severos. Para garantir a precisão e a confiabilidade das leituras, o ensaio contemplou a aplicação de dois ciclos prévios de carregamento para a acomodação mecânica da estrutura e a eliminação de folga nos apoios, minimizando erros de leitura e estabilizando os relógios antes do teste.

Em seguida, o pórtico aplicou uma carga progressiva que atingiu 24.000 kgf (24 toneladas). Neste patamar, o ensaio foi interrompido visando garantir a integridade dos equipamentos de medição instalados e a integridade física dos pesquisadores presentes, sem que a peça laminada apresentasse qualquer indício visual ou acústico de fissuração, flambagem lateral ou ruptura. A conversão das deformações específicas em tensões normais foi possível pela aplicação da Lei de Hooke, adotando-se o módulo de elasticidade longitudinal médio de 145.280 kgf/cm², obtido na fase de caracterização prévia do lote.

A captura mecânica das deformações por meio de relógios comparadores milimétricos, embora requeira maior cautela operacional se comparada à moderna instrumentação elétrica por *strain gauges*, demonstrou precisão adequada. O ajuste linear da curva de Tensão x Carga aplicada resultou em um R^2 de 0,9999. Essa elevada correlação valida as leituras analógicas e certifica a linearidade elástica do material ao longo de todos os ciclos, conforme ilustrado graficamente na Figura 6.

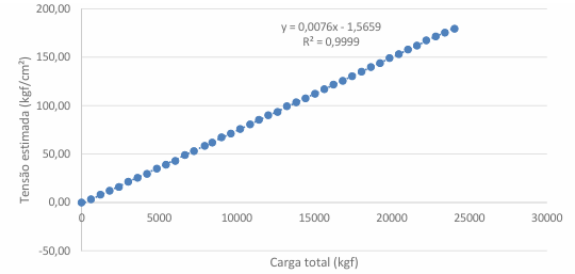

Figura 6. Evolução linear da tensão normal de compressão na fibra extrema da mesa superior em função do incremento da carga total.

Margem de segurança e comportamento no regime elástico

O cruzamento das tensões mapeadas com as propriedades intrínsecas da madeira atesta a considerável resistência e segurança da seção estrutural otimizada. O dimensionamento inicial previa que a estrutura estaria submetida a uma carga de serviço da ordem de 6.643 kgf, correspondendo a uma carga de projeto (majorada) de 9.300 kgf.

Os resultados demonstram que, sob a carga extrema de 24.000 kgf (valor de aproximadamente 2,58 vezes a carga limite de projeto e 3,61 vezes a carga de serviço operacional), a tensão máxima de compressão atuante na viga atingiu cerca de 180 kgf/cm². Este pico de tensão equivale a aproximadamente 55% da resistência característica à compressão paralela às fibras (f_{c0k} = 327,55 kgf/cm²) estipulada para este lote de *Pinus sp.*.

Esse distanciamento em relação ao limite de esmagamento das fibras indica que a estrutura operou com certa folga dentro do regime elástico linear, absorvendo um esforço massivo sem esgotar sua capacidade portante. Dessa forma, conclui-se que o perfil I em MLC com adesivo de mamona possui uma boa margem de segurança, garantindo confiabilidade estrutural para a absorção de sobrecargas imprevistas no Estado Limite Último.

CONCLUSÃO

A investigação atestou que o adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona apresenta viabilidade e eficiência mecânica superiores às exigências estruturais da própria madeira maciça.

Os ensaios destrutivos de cisalhamento longitudinal comprovaram que a junta colada suportou tensões características de ruptura superiores às da madeira sólida em todas as faixas de densidade avaliadas. Esse comportamento garante que, sob esforços extremos de corte incidentes na alma do perfil, a falha ocorrerá pelo esgotamento das fibras naturais do *Pinus sp.*, preservando a integridade da ligação.

Desta forma, conclui-se, portanto, que a formulação de fonte renovável assegura que o sistema permanece monolítico, validando sua aplicação segura como um substituto tecnológico de alto desempenho aos adesivos sintéticos tradicionais na indústria de madeira laminada colada.

A avaliação do perfil I sob esforços fletores apresentou uma reserva de resistência e estabilidade mecânica da seção otimizada. A instrumentação confirmou que a estrutura suportou um carregamento extremo de 24 toneladas sem apresentar indícios físicos de ruptura ou flambagem lateral, mantendo-se inteiramente no regime elástico linear ao longo de todo o ensaio.

Neste nível máximo de solicitação, a tensão normal de compressão operante na fibra mais exigida representou 55% da capacidade resistente limite estipulada para o lote de madeira, demonstrando o aproveitamento inercial da seção transversal. Comprova-se, assim, a confiabilidade do sistema construtivo, o qual opera com margem de segurança frente ao Estado Limite Último para a absorção de sobrecargas excepcionais.

A presente pesquisa verificou que a confecção de perfis estruturais em MLC demanda um controle de variáveis operacionais. A exigência de calibração precisa da pressão de colagem, a necessidade de confinamento mecânico para o alinhamento da alma, o preparo mecânico padronizado das superfícies e a dosagem estrita do adesivo configuram requisitos importantes para análise.

Por fim, diante da complexidade técnica para assegurar a coesão do plano de cola, conclui-se que o processo construtivo assume um caráter preferencialmente industrial, assemelhando-se à logística de componentes pré-moldados. Portanto, a fabricação *in loco* em canteiros de obras apresenta-se tecnicamente incompatível com esta tecnologia, exigindo instalações fabris adequadas para garantir a qualidade estrutural do produto final.

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 7190-1: **Projeto de estruturas de madeira Parte 1: Critérios de dimensionamento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASTM D905-08 (2021). **Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading.** ASTM International, West Conshohocken, PA.

CORREIA, E. A. S. **Análise e dimensionamento de estruturas de madeira**. 2009. 163 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

COURI PETRAUSKI, S. M. F. **Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto, utilizando adesivo à base de resorcinol e óleo de mamona**. 2012. 139 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, Maringá, p. 35-45, 2009.

MOREIRA, M. S. S. **Ligações estruturais de peças de madeira por meio de adesivo em áreas reduzidas associado a elementos de pinos**. 2004. 462 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

SILVA, C. C. **Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal "I" para uso em fôrmas**. 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.