

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

CLEYTON MACHADO PRATA FILHO

DELAMINAÇÃO EM NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS COLADOS
A BASE DE PAINEL OSL

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2025

CLEYTON MACHADO PRATA FILHO

DELAMINAÇÃO EM NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS COLADOS
A BASE DE PAINEL OSL

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2025

CLEYTON MACHADO PRATA FILHO

DELAMINAÇÃO EM NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS
COLADOS A PARTIR DE PAINEL OSL

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 06 de março de 2025.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 FABRÍCIO GOMES GONÇALVES
Data: 24/03/2025 14:09:00-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Documento assinado digitalmente
 EMILLY SOARES GOMES DA SILVA
Data: 24/03/2025 14:14:29-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Emilly Soares Gomes da Silva
Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais - UFES
Examinadora

Documento assinado digitalmente
 PEDRO GUTENBERG DE ALCANTARA SEGUNDINHO
Data: 24/03/2025 14:23:29-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso representa o encerramento de uma jornada repleta de desafios, aprendizado e crescimento. Nada disso teria sido possível sem o apoio de diversas pessoas, às quais expresso minha mais sincera gratidão.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar força e perseverança ao longo dessa caminhada. À minha família, em especial à minha mãe, pelo amor incondicional, pelo incentivo e por acreditar em mim mesmo nos momentos mais difíceis. Sem vocês, essa conquista não teria o mesmo significado.

Gostaria de agradecer também à minha namorada e futura esposa, Linnica, pelo companheirismo ao longo desses anos, por ter me apoiado, incentivado e me ajudado a realizar esse sonho. Sua presença ao meu lado tornou essa caminhada muito mais especial e significativa.

Ao meu orientador, Fabricio, sou grato pela paciência, dedicação e valiosas orientações que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento e incentivo foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios deste projeto.

Aos colegas e amigos que fizeram parte dessa trajetória, meu muito obrigado pelo companheirismo, pelas trocas de conhecimento e pelo apoio nos momentos de dificuldades. A caminhada foi árdua, mas a amizade e a colaboração tornaram tudo mais leve e enriquecedor.

Agradeço também aos professores do curso de Engenharia Industrial Madeireira, que compartilharam seu conhecimento e experiência, contribuindo significativamente para minha formação profissional.

A todos, o meu mais sincero obrigado!

RESUMO

A utilização de elementos estruturais colados de forma eficiente não apenas melhora o desempenho técnico e a durabilidade das edificações, mas também impulsiona a previsão econômica da madeira engenheirada, tornando-a uma alternativa competitiva frente a materiais tradicionais de maior impacto ambiental. Desta forma, o estudo reforça a importância da madeira laminada colada como uma solução alinhada às demandas globais de sustentabilidade, eficiência energética e desenvolvimento econômico no setor da construção. O estudo utilizou diferentes configurações estruturais e especificações de materiais, como madeira lamelada colada, vigas tipo "I" e elementos cheios, com mesas de pinus e eucalipto. Foram realizados ensaios de delaminação seguindo a norma AITC T110, envolvendo ciclos de umedecimento e secagem para condições simuladas adversas. Os tratamentos que utilizaram adesivo à base de resorcinol, especialmente em vigas tipo "I", apresentaram desempenho superior, com valores de delaminação inferiores aos limites normativos estabelecidos. Os elementos que empregaram núcleo de partículas OSL apresentaram maiores taxas de delaminação, culminando em limitações no desempenho desses materiais em condições extremas. O estudo contribuiu para a validação técnica e ampliação do uso destes tipos de elementos na construção civil sustentável.

Palavras-chave: Delaminação. Resistência estrutural. Sustentabilidade. Vigas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 O problema e sua importância	8
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral.....	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 Utilização da madeira no setor da construção civil	11
3.2 Identificação das chapas de madeira utilizadas na construção civil	13
3.3 Vigas engenheiradas	14
3.4 Madeira Lamelada Colada (MLC) estrutural	18
3.5 Adesivos utilizados na indústria	19
3.6 Aplicação do adesivo	20
3.7 Resistência do adesivo	21
3.8 Delaminação	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1 Obtenção dos corpos de prova.....	24
4.2 Ensaio de delaminação.....	25
4.3 Análise dos dados.....	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
6 CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um recurso natural renovável amplamente utilizado em diversos setores, com destaque para a construção civil, onde vem ganhando relevância devido às suas propriedades mecânicas, versatilidade e apelo ambiental. Como material estrutural, a madeira oferece vantagens como leveza, durabilidade e capacidade de captura e armazenamento de carbono, contribuindo para mitigar os impactos das mudanças climáticas (Yadav; Kumar, 2022; Younis; Doodoo, 2022).

O manejo sustentável de florestas plantadas e a evolução tecnológica são processos que potencializam e diversificam o uso de madeiras reconstituídas em elementos estruturais, onde a madeira lamelada colada (MLC) se torna uma das alternativas versáteis de aplicação e que tendem a contribuir na redução de impactos ambientais.

A MLC destaca-se como uma solução versátil e inovadora na construção civil. Formada por lâminas de madeira coladas em camadas paralelas ou cruzadas, essa tecnologia permite a criação de peças estruturais de grande porte com desempenho superior às madeiras maciças tradicionais. Sua produção pode integrar diferentes espécies de madeira e adesivos de alta resistência, como os à base de resorcinol e poliuretano, garantindo propriedades mecânicas otimizadas e resistência em ambientes de alta umidade ou exposição externa (Kim; Lee; Lee, 2024).

Apesar de suas vantagens, o uso da MLC enfrenta desafios técnicos, especialmente no Brasil, onde ainda há barreiras culturais e normativas para sua ampla adoção. Um dos principais problemas é a delaminação, caracterizada pela separação das camadas coladas devido a tensões internas ou fatores ambientais, como variações de temperatura e umidade. A delaminação compromete a durabilidade da linha de cola, que é essencial para garantir a segurança e a vida útil das construções (Segundinho *et al.*, 2018).

À manipulação dos adesivos em condições adversas de umidade, temperatura e ciclos de carga, resulta na separação das lâminas de madeira e, conseqüentemente, na diminuição da fraqueza e resistência mecânica da estrutura. Uma delaminação superior a 10% do comprimento total da linha de cola compromete significativamente o desempenho estrutural, tornando o material inadequado para aplicações externas (AITC T110, 2007). Dessa forma, a seleção de adesivos protegidos e a otimização do

processo de coleta são essenciais para minimizar a ocorrência desse defeito e garantir a durabilidade das construções em madeira.

A umidade exerce influência significativa no desempenho MLC, afetando sua estabilidade dimensional, resistência mecânica e durabilidade. A variação do teor de umidade provoca contrações e expansões nas lâminas de madeira, resultando em tensões internas que podem comprometer a integridade estrutural da peça, aumentando o risco de delaminação e falhas adesivas (Segundinho *et al.*, 2018). Além disso, níveis elevados de umidade favorecem a manipulação dos adesivos e a proteção de agentes biológicos, como fungos e bactérias, proporcionando a vida útil do material (Fiorelli; Dias, 2005).

Com o aumento da demanda por soluções construtivas sustentáveis, têm sido intensificados os esforços para o desenvolvimento de pesquisas voltadas a novos materiais e adesivos, com ênfase em alternativas de base biológica. Dentre eles, destacam-se os adesivos à base de tanino, que se apresentam como uma opção promissora por aliarem alta eficiência técnica à redução do impacto ambiental (Kumar; Leggate, 2022). Nesse contexto, este trabalho busca avaliar a resistência de novos elementos estruturais colados, submetidos a condições de umidade extremas.

1.1 O problema e sua importância

A madeira laminada colada (MLC) apresenta-se como uma alternativa inovadora e sustentável na construção civil, permitindo a utilização eficiente de madeira reflorestada, promovendo a redução do impacto ambiental e atendendo à crescente demanda por materiais de alto desempenho. Apesar de suas vantagens, o uso de elementos de MLC ainda enfrenta barreiras técnicas e normativas no Brasil, onde a principal delas, é garantir a resistência e a durabilidade da linha de cola, responsável por unir as lâminas de madeira que compõem o material (Segundinho *et al.*, 2018).

A delaminação, caracterizada pela separação das camadas coladas, ocorre devido a tensões mecânicas, variações de temperatura e umidade, bem como falhas na aplicação ou formulação do adesivo. Esse fenômeno pode comprometer a integridade estrutural e a segurança das construções, limitando a aceitação do material no mercado (Calil Neto, 2011). Estudos apontam que a durabilidade das juntas coladas depende de fatores como o tipo de adesivo, a compatibilidade química

com a madeira utilizada, o processo de colagem e as condições ambientais às quais o material será exposto (Fiorelli; Dias, 2005; Pereira, 2014).

No Brasil, o desconhecimento técnico e a falta de padronização no uso de MLC reforçam a necessidade de estudos específicos para validar suas propriedades e ampliar seu emprego em estruturas de grande porte. Ensaios como o de delaminação, realizados conforme normas internacionais, são essenciais para atestar a qualidade das linhas de cola e assegurar o desempenho do material ao longo do tempo. A partir dessas análises, é possível promover a adoção de produtos à base de MLC como uma alternativa viável e segura em estruturas, contribuindo para a modernização e sustentabilidade do setor da construção civil.

Este trabalho buscou preencher essa lacuna ao avaliar a resistência da linha de cola em novos elementos estruturais, verificando sua conformidade com padrões normativos. Além de fornecer subsídios técnicos para a liberdade do material no mercado, essa abordagem desempenha um papel fundamental na promoção de práticas construtivas mais sustentáveis, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e a emissão de carbono na construção civil.

A utilização de elementos estruturais colados de forma eficiente não apenas melhora o desempenho técnico e a durabilidade das edificações, mas também impulsiona a previsão econômica da madeira engenheirada, tornando-a uma alternativa competitiva frente a materiais tradicionais de maior impacto ambiental. Desta forma, o estudo reforça a importância da madeira laminada colada como uma solução alinhada às demandas globais de sustentabilidade, eficiência energética e desenvolvimento econômico no setor da construção.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Verificar a resistência da linha de cola dos novos elementos estruturais, por meio do ensaio de delaminação.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a delaminação dos elementos estruturais fabricados, submetendo-os aos ensaios conforme a norma AITC T110, considerando condições extremas de umidade e pressão;
- Comparar o desempenho de adesivos à base de resorcinol e fenol-formaldeído em termos de resistência à delaminação, considerando duas espécies de madeira utilizadas;
- Identificar a influência das configurações estruturais na resistência à delaminação em diferentes condições de ensaio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Utilização da madeira no setor da construção civil

A madeira é um recurso renovável amplamente utilizado na construção civil, devido às suas propriedades mecânicas e ambientais adequadas. Suas características estruturais, como alta resistência à melhoria e flexão, além de sua leveza e facilidade de processamento, tornam-na uma opção viável para diversas aplicações (Kwai, 2013). A madeira contribui significativamente para a sustentabilidade, pois é um material biodegradável, reutilizável e com um ciclo de vida que pode ser considerado neutro em termos de carbono.

O uso da madeira na construção civil tem se consolidado ao longo das décadas, acompanhando o avanço das tecnologias de processamento e tratamento, que possibilitaram a ampliação de suas aplicações. Nos últimos anos, o mercado tem demonstrado um crescimento gradual no uso da madeira como material de construção, especialmente em projetos sustentáveis. Em 2018, cerca de 35% dos novos edifícios residentes no Brasil utilizam madeira em suas estruturas, refletindo uma tendência crescente em direção ao uso de materiais naturais e renováveis (Fogaça, 2024).

No Brasil, o uso da madeira como material estrutural ainda enfrenta desafios, como o uso inadequado em projetos e o aproveitamento insuficiente das propriedades físico-mecânicas desse material. Essas limitações decorrem, em parte, do conhecimento restrito sobre o desempenho da madeira em diferentes condições de aplicação, especialmente em relação às espécies nativas e exóticas disponíveis no mercado nacional (Singh *et al.*, 2022).

A indústria florestal brasileira contribui diretamente para o setor da construção civil, fornecendo madeira de alta qualidade proveniente de técnicas avançadas de manejo, como o plantio em mosaico, que combina áreas produtivas com zonas de conservação (Martins *et al.*, 2017). Esse modelo não apenas garante a sustentabilidade do recurso, mas também melhorou a qualidade ambiental ao preservar a biodiversidade e reduzir as emissões de carbono. Na construção, a madeira é valorizada por sua leveza, resistência e eficiência térmica, qualidades que

se tornam ideais tanto para edificações residenciais quanto comerciais (Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ, 2024).

Para maximizar o potencial da madeira em aplicações estruturais, é essencial realizar estudos mais detalhados sobre suas propriedades físico-químicas, resistência mecânica e durabilidade. O desenvolvimento de novas tecnologias, como os tratamentos térmicos e químicos, tem possibilitado a adaptação de espécies antes subutilizadas para aplicações em que a exigência estrutural é necessária (Ren *et al.*, 2024).

Os avanços tecnológicos no processamento e tratamento da madeira ampliam suas possibilidades de uso na construção civil, como em estruturas pré-fabricadas e madeira engenheirada, que competem com materiais convencionais em durabilidade, desempenho e inovações, aliadas ao compromisso do setor com a descarbonização e a economia circular, que posicionam a madeira como uma estratégia material para edificações sustentáveis, promovendo a eficiência energética e o alinhamento com metas globais de sustentabilidade (IBÁ, 2024).

Entre os avanços mais significativos no mercado internacional e nacional, destaca-se a madeira lamelada colada (MLC), reconhecida por sua eficiência estrutural e adaptabilidade. Formada por lâminas de madeira unidas por adesivos de alta performance, como resinas à base de poliuretano e epóxi (Figura 1), a MLC permite a criação de peças estruturais de maiores dimensões, garantindo alta resistência mecânica e versatilidade no design arquitetônico (Yadav; Kumar, 2022).



Figura 1 - Esquema de uma viga de MLC.
Fonte: Zangiácomo e Lahr (2007).

3.2 Identificação das chapas de madeira utilizadas na construção civil

As chapas de madeira são produtos projetados derivados de madeira, fabricados a partir da compactação e colagem de partículas, fibras ou lâminas de madeira com adesivos sintéticos (Lima *et al.*, 2006). Elas desempenham um papel fundamental na construção civil, devido à sua versatilidade, sustentabilidade e desempenho técnico. Esses materiais são classificados em três categorias principais, tais como, painéis de partículas e flocos (como *Waferboard*, OSB, PB e MDP), painéis de fibras (HB, IB e MDF) e painéis de lâminas (PW e BB).

O *Waferboard* (WB), desenvolvido na década de 1950, é composto por flocos de madeira prensados a quente com resinas fenólicas, formando um painel de baixa estabilidade dimensional e desempenho estrutural limitado (Renzo, 2008). Posteriormente, esse material foi substituído em grande parte pelo *Oriented Strand Board* (OSB), uma evolução tecnológica que utiliza partículas de madeira orientadas em camadas cruzadas e unidas por resinas de alta resistência à umidade (Araujo *et al.*, 2020). Desenvolvido na década de 1980, o OSB é amplamente utilizado na construção civil devido à sua eficiência produtiva e desempenho estrutural elevado, consolidando-se como uma alternativa ao compensado tradicional. Com maior resistência e durabilidade, o OSB destaca-se por sua capacidade de utilizar espécies de menor valor comercial (paricá, amapá, oiticica), promovendo o uso eficiente dos recursos florestais (Xiong; Ma; Ren, 2020).

O *Particleboard* (PB), conhecido como aglomerado, é fabricado com partículas de madeira aglutinadas por resinas sintéticas sob alta temperatura e pressão. Amplamente empregado na indústria moveleira, possui aplicação limitada na construção civil, sendo utilizado principalmente em revestimentos internos e pisos secos (Li *et al.*, 2014). Por sua vez, o *Medium Density Particleboard* (MDP), uma evolução do aglomerado convencional, é produzido com tecnologia de prensagem contínua e utiliza matérias-primas provenientes de florestas plantadas. Essa abordagem moderna resulta em painéis de maior uniformidade e desempenho mecânico, ampliando suas aplicações em móveis e decoração (Brito *et al.*, 2022).

Os painéis de fibras, como o *Hardboard* (HB) e o *Insulation Board* (IB), possuem características específicas que os diferenciam. O HB, ou chapa dura, apresenta elevada densidade e acabamento superficial uniforme, sendo utilizado em

revestimentos e decorações. Já o IB, ou chapa isolante, é um painel de baixa densidade voltado para isolamento acústico e térmico, produzido sem prensagem a quente e com um processo simples e econômico (Gumowska; Kowaluk, 2023). O *Medium Density Fiberboard* (MDF), por sua vez, destaca-se pela uniformidade, estabilidade dimensional e excelente usinabilidade, sendo amplamente utilizado em aplicações que exigem superfícies lisas e planas. Recentes avanços como o uso de resinas de baixa emissão de formaldeído, ampliam sua aplicabilidade em ambientes de alta umidade (Hemmila *et al.*, 2017).

Entre os painéis de lâminas, o compensado (PW) é fabricado pela sobreposição de lâminas de madeira em camadas cruzadas, proporcionando resistência mecânica e durabilidade superiores, especialmente quando colado com resinas fenólicas. Conforme o mesmo autor, essa configuração o torna ideal para aplicações em ambientes externos e de alta exigência estrutural (Heliodoro, 2021). O *Blockboard* (BB), por sua vez, utiliza sarrafos de madeira como miolo, revestidos por lâminas finas. Essa abordagem reduz o peso do painel e aproveita resíduos industriais, sendo uma alternativa sustentável para móveis e divisórias internas (Reis *et al.*, 2019).

3.3 Vigas engenheiradas

As vigas de madeira são elementos estruturais sólidos, amplamente trabalhados na construção civil, são caracterizadas por suportarem livres e apresentarem diferentes formas geométricas, como metálicas cilíndricas, retangulares e curvilíneas (Araújo *et al.*, 2020). Segundo os mesmos autores, entre os diversos tipos de vigas de madeira, destacam-se: madeira serrada, madeira lamelada colada (MLC), vigas reforçadas, LSL (*Laminated Strand Lumber*), OSL (*Oriented Strand Lumber*), LVL (*Laminated Veneer Lumber*), PSL (*Parallel Strand Lumber*), viga-caixão, viga tipo "I" e viga "flitch" (Figura 2)

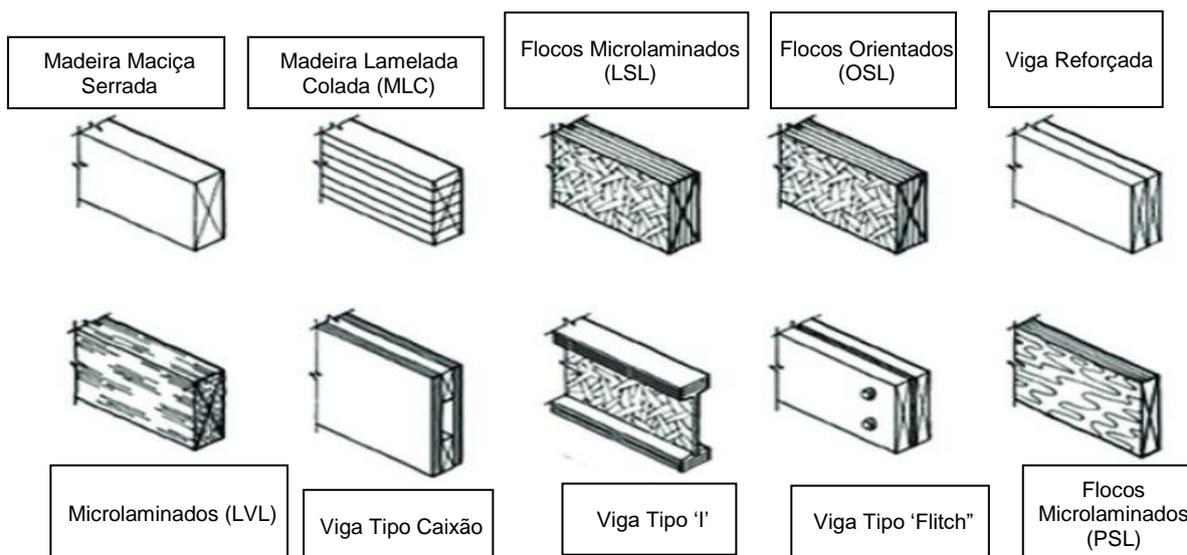


Figura 2 – Tipos de elementos estruturais produzidos a partir da madeira.
 Fonte: Araújo *et al.* (2020).

A madeira serrada é produzida por meio do processamento de toras, que são seccionadas em blocos, e posteriormente, serradas em duas ou quatro faces. No caso de peças com cortes em apenas duas superfícies planas, resultando em duas faces arredondadas, o método é considerado mais simples. Já o processamento completo envolve a usinagem de todas as quatro faces, resultando em uma peça totalmente regularizada.

A viga-caixão é composta por duas tábuas paralelas conectadas e revestidas externamente com chapas de compensado, unidas mediante o uso de pregos e adesivos, formando uma estrutura oca (Alves *et al.*, 2023). Essa configuração resulta em um elemento estrutural de nível e com resistência adequada para aplicações que não exigem suporte a grandes cargas estruturais (Araújo *et al.*, 2020).

A madeira lamelada colada (MLC), internacionalmente conhecida como *Glued Laminated Timber* (Glulam), consiste em três ou mais camadas de tábuas (lamelas) coladas com as fibras orientadas paralelamente ao eixo longitudinal do elemento. Essa disposição permite a fabricação de peças com formatos retos ou curvos, adaptáveis a diferentes demandas arquitetônicas e estruturais (Silva *et al.*, 2023).

As lamelas são rigorosamente dimensionadas e coladas com adesivos de alta performance, onde geralmente é formada à base de resinas fenólicas ou poliuretano, que garantem durabilidade e resistência mecânica. A união das extremidades das lamelas, por meio de encaixes, viabiliza a produção de elementos alongados, atendendo às exigências de construções de grande porte (Silva *et al.*, 2023). Esse

sistema tem se consolidado como uma solução inovadora e sustentável no setor da construção civil, sendo amplamente utilizado em pontes, edifícios e outras estruturas complexas (Santis *et al.*, 2023; Vito Júnior; Vicente, 2023).

O *Laminated Strand Lumber* (LSL) é uma variação linear do OSB, composta por partículas alongadas e orientadas paralelamente ao comprimento da peça. As partículas, que possuem cerca de 300 mm de comprimento, são significativamente maiores que as do OSB convencional (Hasan *et al.*, 2024). Essa configuração confere ao LSL alta resistência à flexão e estabilidade dimensional, apresentando características que têm ampliado sua aplicação em edifícios residenciais e comerciais leves. Sua produção utiliza espécies de menor valor comercial, promovendo eficiência no uso de recursos florestais (Hemmila *et al.*, 2017).

De forma similar, o *Oriented Strand Lumber* (OSL) é composto por partículas longas de madeira, alinhadas em camadas que são compactadas por prensas ao vapor (Yadav; Kumar, 2022). O resultado é um material estrutural com densidade uniforme e excelente resistência mecânica. O OSL é particularmente indicado para aplicações em estruturas de suporte e vigas, devido à sua elevada estabilidade e à capacidade de suportar cargas elevadas (Aguiar *et al.*, 2023).

Vigas reforçadas são formadas por tábuas unidas mecanicamente por pregos ou parafusos, criando uma estrutura coesa e resistente. Essa técnica melhora a estabilidade das vigas e reduz a probabilidade de defeitos estruturais, como rachaduras ou a presença de nós e bolsas de resina (Kossakowski, 2024). Essas vigas têm sido amplamente utilizadas em construções que exigem alta performance estrutural, combinando eficiência técnica e economia de recursos (Svajlenka; Posivakova, 2023).

A *Laminated Veneer Lumber* (LVL) é um material estruturado a partir de lâminas finas de madeira unidas paralelamente às fibras (Romero; Odenbreit, 2023). Esse tipo de material possui um desempenho superior em aplicações estruturais devido à alta resistência mecânica, baixa deformação e durabilidade aprimorada, especialmente quando reforçado com materiais como polímeros reforçados com fibras de carbono (Bakalarz; Kossakowski, 2024). O uso de adesivos modernos, como os fenólicos, amplia suas aplicações em móveis e construções sustentáveis (Illuyomade; Okwandu, 2024).

As vigas *flitch*, compostas por madeira e aço, continuam relevantes para vencer grandes vãos estruturais. A combinação melhora a capacidade de carga, a resistência

ao cisalhamento e a eficiência estrutural geral. Essa tecnologia híbrida é particularmente eficaz para prolongar a vida útil de estruturas de madeira existentes ou em condições de carga variável (Issa; Kmeid, 2005).

As vigas tipo “I” continuam sendo amplamente empregadas, especialmente em construções de grande porte, devido à sua eficiência estrutural e leveza. Existem avanços na resistência axial e na rigidez dos flanges quando compostos por *Laminated Veneer Lumber* (LVL) em conjunto com núcleos de *Oriented Strand Board* (OSB), proporcionando maior desempenho mecânico e estabilidade dimensional (Issa; Kmeid, 2005). Além disso, a incorporação de tecnologias computacionais avançadas para a simulação de carga e deformação tem permitido otimizações no design dessas vigas, possibilitando construções mais seguras e eficientes (Tomé, 2022).

A *Parallel Strand Lumber* (PSL), destaca-se em aplicações de alta carga, com uso crescente de adesivos sustentáveis e técnicas de prensagem eficientes (Illuyomade; Okwandu, 2024). Conforme os mesmos autores, estudos enfatizam o controle rigoroso das dimensões das tiras de madeira para garantir desempenho mecânico uniforme, além de destacar sua viabilidade em construções de alto desempenho.

A partir do conceito de madeira lamelada colada, os compostos estruturais modernos, como os painéis colados lateralmente e ortogonalmente, continuam a evoluir para aplicações mais eficientes e sustentáveis. O *Edge Glued Panel* (EGP) é um produto de madeira engenheirada formado pela união de lâminas ou peças de madeira maciça, coladas lateralmente ao longo de suas bordas longitudinais (Keffer *et al.*, 2024). Ele tem se destacado por sua versatilidade em projetos de marcenaria, com avanços significativos na eficiência do adesivo e processos de prensagem (Lanhe; Israel; Haupt, 2024). Há um impacto da densidade da madeira, do peso do adesivo e das condições de prensagem no desempenho mecânico, permitindo otimizações conforme o tipo de madeira e a aplicação pretendida (Lanhe; Israel; Haupt, 2024).

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (CLT) representa uma tecnologia revolucionária na construção sustentável, com forte apelo por sua flexibilidade e eficiência estrutural (Figura 3). O uso de CLT vem sendo amplamente utilizado em construções de médio e grande porte, reforçando sua capacidade de substituir materiais tradicionais e reduzir emissões de carbono. Inovações no processo de

fabricação têm melhorado ainda mais sua estabilidade e resistência, promovendo maior aceitação no mercado global (Crawley, 2021).

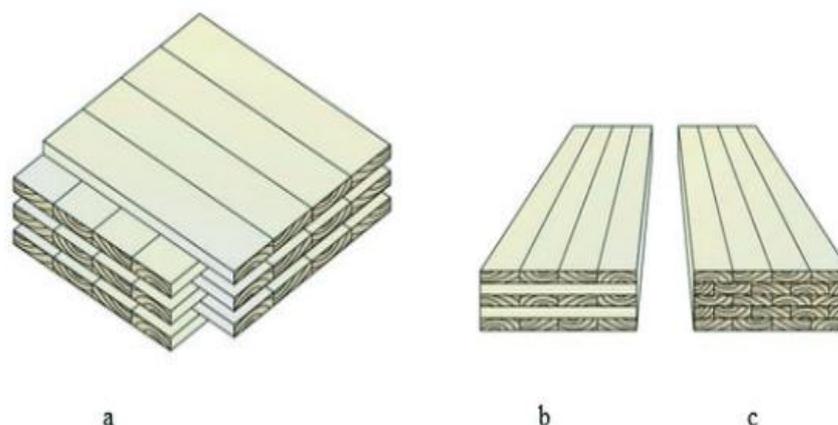


Figura 3 - Madeira Lamelada Colada Cruzada: (a) Painéis e comparativo entre as vigas de (b) CLT com camadas ortogonais e (c) MLC com camadas paralelas.

Fonte: FPIInnovations (2011).

O uso de madeira de reflorestamento na produção de vigas engenheiradas é uma alternativa sustentável e economicamente viável para a construção civil, pois espécies como eucalipto e pinus possuem rápido crescimento, alta disponibilidade e boas propriedades mecânicas. Além de apresentarem excelente relação resistência/peso, podem ser tratadas para maior durabilidade e resistência a agentes externos. Seu uso reduz a dependência de madeiras nobres, permite industrialização em larga escala e favorece a construção sustentável, contribuindo para a redução do impacto ambiental e a mitigação das emissões de CO₂ (Araújo *et al.*, 2020).

3.4 Madeira Lamelada Colada (MLC) estrutural

A MLC para fins estruturais é definida como um material composto por tábuas de dimensões reduzidas em relação à peça final, dispostas com as fibras alinhadas paralelamente ao eixo longitudinal da peça final. Elas são amplamente aplicadas em vigas, pilares, treliças, lajes, entre outros (Segundinho *et al.*, 2018). A qualidade do produto final é diretamente influenciada pelas etapas do processo de fabricação, sendo necessário que os fabricantes garantam a resistência dos elementos colados por meio de controle rigoroso de qualidade de cada componente envolvido no processo (Leite; Santos; Valle, 2017).

A revisão da norma NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2012), seção 7, especifica diretrizes específicas para a fabricação de MLC, abrangendo critérios relacionados à seleção de tábuas, tratamento preservativo, teor de umidade, classificação visual, emendas dentadas, adesivos e controle de qualidade. Estas recomendações visam garantir o desempenho e a qualidade dos elementos estruturais fabricados, e destacam-se entre as diretrizes sugeridas por Leite, Santos e Valle (2017), os seguintes pontos:

- Classificação visual e testes iniciais: Antes do início do processo produtivo, as tábuas devem ser submetidas à classificação visual, com avaliação de nós e grãos, e ao teste de módulo de especificação;
- Controle de umidade: As tábuas devem ser secas previamente, apresentando um teor de umidade máximo de 18% no momento da instalação;
- Espécies e densidade: Recomenda-se evitar a mistura de diferentes espécies de madeira. As tábuas deverão apresentar densidade aparente entre 0,40 e 0,75 g cm⁻³, considerando um teor de umidade padrão de 12%;
- Tratamento preservativo: Tanto as barbas quanto o produto final devem passar por tratamento preservativo, garantindo maior durabilidade e proteção contra agentes biológicos;
- Adesivos estruturais: Os adesivos utilizados devem ser protegidos para aplicações estruturais e compatíveis com as condições ambientais aos quais os elementos serão expostos ao longo de sua vida útil;
- Conexões entre tábuas: A união de topo entre tábuas é realizada por emendas dentadas ou *finger joints*, garantindo continuidade estrutural e uniformidade na peça final.

3.5 Adesivos utilizados na indústria

Os adesivos desempenham um papel fundamental na indústria da madeira, sendo utilizados em mais de 70% dos produtos derivados desse material (Hara, 2024). A evolução tecnológica tem priorizado alternativas sustentáveis e de alta eficiência para substituir os adesivos tradicionais derivados de fontes fósseis. Atualmente, adesivos como ureia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (PF), melamina-ureia-formaldeído (MUF), poliuretano (PU), poliacetato de vinila (PVA) e adesivos à base de

soja são amplamente utilizados devido a suas propriedades de resistência, custo-benefício e viabilidade em aplicações industriais (Moraes, 2021).

Os adesivos UF continuam sendo os mais amplamente utilizados devido ao baixo custo e rápida cura, apesar das limitações de resistência à umidade. Por outro lado, os adesivos MUF estão ganhando destaque em aplicações externas devido à sua maior resistência à água. Adesivos à base de poliuretano, que reagem com a umidade presente na madeira, têm sido usados para aplicações exigentes, como na fabricação de elementos de madeira estruturais, à exemplo do CLT e da MLC (Arantes *et al.*, 2023).

Houve um avanço significativo em adesivos sustentáveis baseados em biomassa, como os derivados de taninos, lignina, proteínas, óleos naturais e amidos. Estes materiais oferecem alternativas de baixa emissão de formaldeído (ou até mesmo nula), atendendo as regulamentações ambientais mais rigorosas (Tian *et al.*, 2023). Segundo os mesmos autores, adesivos à base de soja têm demonstrado forte crescimento devido à sua origem renovável e baixas emissões, tornando-se uma escolha popular para painéis de madeira e produtos de mobiliário de alta qualidade. A adição de proteínas de soja a resinas fenol-formaldeído, por exemplo, pode reduzir custos sem comprometer o desempenho.

Ademais, o mercado de adesivos para madeira deve crescer a uma taxa anual de 8,6% até 2030, impulsionado pela demanda de painéis de madeira engenheirada, construção civil e móveis. Esse crescimento reflete a busca por eficiência na utilização de recursos florestais e inovação em adesivos sustentáveis (Tian *et al.*, 2023).

3.6 Aplicação do adesivo

Adesivos à base de poliuretano (PUR) e fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) são os mais utilizados. Os adesivos PUR reagem com a umidade presente na madeira para iniciar a cura, enquanto os adesivos PRF exigem a mistura prévia de dois componentes para ativar suas propriedades adesivas. Esses adesivos são preferidos por sua resistência a condições ambientais adversas e por atenderem às exigências de normas internacionais para estruturas de madeira (Arantes *et al.*, 2023).

A aplicação de adesivos na fabricação de MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada) e MLC (Madeira Lamelada Colada) deve ser feita de forma minuciosa na produção de materiais de madeira engenheirada, garantindo qualidade estrutural e

eficiência no uso de recursos. O processo é realizado principalmente por coladeiras industriais que aplicam o adesivo de forma contínua sobre as lamelas de madeira (Yu *et al.*, 2024). Essas máquinas, que operam em velocidades que podem variar entre 18 e 60 m min⁻¹, utilizam cabeçotes especializados para distribuir o adesivo uniformemente, assegurando cobertura adequada (Hussin *et al.*, 2020). A uniformidade é essencial para evitar falhas de colagem, que podem comprometer o desempenho estrutural do produto final.

A aplicação do adesivo deve ocorrer em um ambiente controlado para evitar a cura prematura e garantir a aderência ideal. Temperatura, umidade e tempo de montagem são variáveis que precisam ser monitoradas rigorosamente (Silva *et al.*, 2022). Segundo os mesmos autores, o tempo de montagem, definido pelo fabricante, é especialmente crítico, já que atrasos podem resultar em colagens inadequadas devido ao início precoce do processo de cura

Superfícies das lamelas devem estar devidamente preparadas, limpas e livres de contaminantes como poeira e óleos. O aplainamento melhora a penetração do adesivo, mas a oxidação do adesivo pode reduzir a porosidade da madeira após 24 horas, impactando negativamente a adesão. Portanto, recomenda-se a aplicação do adesivo logo após o aplainamento (Jarecki *et al.*, 2024).

A introdução de tecnologias automatizadas para o controle da aplicação de adesivos tem avançado significativamente, como sistemas de aplicação por rolo, robôs dosadores e dispensadores automatizados, permitem maior precisão e padronização no processo, o que reduz desperdícios e garante maior eficiência no uso de matérias-primas (Santiago *et al.*, 20180).

3.7 Resistência do adesivo

A resistência do adesivo é mecanicamente definida pela força necessária para separar substratos unidos, sendo fortemente influenciada pelas interações químicas e mecânicas entre o adesivo e a madeira. As ligações químicas primárias (covalentes) e secundárias (pontes de hidrogênio e forças de Van der Waal) na cadeia do polímero do adesivo e na interface adesivo-madeira desempenham um papel determinante na resistência global (Kumar; Leggate, 2022). Quando a linha de cola é mais resistente do que a madeira, falhas tendem a ocorrer no substrato ao invés da interface adesiva (Frihart, 2005).

Fatores como tipo de adesivo, tempo de cura, pressão de aplicação, umidade e densidade da madeira impactam significativamente o desempenho mecânico da união. Por exemplo, adesivos fenólicos e poliuretanos oferecem maior resistência em condições de alta umidade, enquanto adesivos ureia-formaldeído podem ser menos eficazes em ambientes úmidos (Ramachandrareddy *et al.*, 2022). A preparação da superfície da madeira também é crítica, pois, superfícies bem aplainadas, livres de poeira e óleo, e com orientação específica (radial ou tangencial) contribuem para melhores resultados de adesão (Özçifçi; Yapici, 2008).

O pH do adesivo deve ser compatível com o pH da madeira, uma vez que, madeiras com pH ácido, como algumas espécies de *Eucalyptus*, podem acelerar a cura de adesivos à base de ureia-formaldeído, enquanto madeiras alcalinas podem retardar esse processo, influenciando na qualidade da linha de cola (Segundinho *et al.*, 2018).

A resistência ao cisalhamento de juntas coladas varia entre espécies e adesivos, refletindo interações complexas entre as características anatômicas da madeira e as propriedades químicas do adesivo (Bianche *et al.*, 2022). A resistência do adesivo afeta diretamente a resistência ao cisalhamento, garantindo a transferência de esforços entre as peças de madeira. Adesivos fortes evitam falhas coesivas e adesivas, enquanto certa flexibilidade ajuda a dissipar tensões. Além disso, a estabilidade frente à umidade e ao tempo é essencial para a durabilidade da linha de cola (Sciomenta *et al.*, 2024).

3.8 Delaminação

Conforme estabelecido pela norma da *American Institute of Timber Construction* AITC T110 (2007), o procedimento de avaliação da resistência das linhas de cola em MLC envolve a colocação dos corpos de prova em uma autoclave, onde as amostras são sujeitas a ciclos repetidos de vácuo e pressão. Esse processo é seguido por três ciclos alternados de umedecimento e secagem, que se estendem por um período de 12 dias. Durante esse tempo, as linhas de cola são expostas a condições que simulam variações ambientais, com o objetivo de avaliar sua durabilidade sob mecânicas e mudanças de umidade.

A delaminação é quantificada com base no comprimento total das linhas de cola que apresentaram falhas, dividido pelo comprimento total da linha de cola,

resultando na percentagem de delaminação (Segundinho *et al.*, 2013). Essa métrica é crucial, pois fornece informações sobre a resistência do adesivo à separação das camadas de madeira, fator determinante para a longevidade e a integridade estrutural da madeira lamelada.

A avaliação da eficiência dos adesivos utilizados na junção dos elementos estruturais, é crucial para garantir que os produtos da MLC possam resistir às condições adversas a que estão sujeitos ao longo de sua vida útil. Fatores como variações de umidade, temperatura e pressão influenciam diretamente o desempenho das colagens, afetando a resistência mecânica e a durabilidade do material (Fiorelli; Dias, 2005).

O comportamento dos adesivos sob as condições citadas acima pode ser considerado um indicativo do desempenho do elemento estruturante em diferentes cenários, incluindo ambientes úmidos ou sujeitos a variações térmicas, onde a estabilidade da proteção é fundamental para a segurança e a eficiência dos projetos de construção que utilizam MLC (Segundinho *et al.*, 2018).

A avaliação da delaminação pode ser utilizada para desenvolver novos adesivos ou melhorar os existentes, adaptando-os a diferentes critérios de desempenho para a indústria de construção, onde a madeira lamelada colada tem se mostrada uma alternativa sustentável e de alta resistência.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Obtenção dos corpos de prova

Os novos elementos estruturais colados foram desenvolvidos com base em um projeto inovador realizado na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), especificamente no Laboratório Multiusuário de Painéis do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM), localizado em Jerônimo Monteiro, sul do estado do Espírito Santo. A fabricação desses elementos encontra-se em processo de patenteamento, motivo pelo qual os detalhes específicos sobre seu desenvolvimento não foram apresentados neste trabalho.

Os corpos de prova para o trabalho foram obtidos nas extremidades das vigas após a realização do ensaio destrutivo (flexão estática). Foram avaliados seis tipos diferentes de tratamentos aplicados aos novos elementos estruturais (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos utilizados para elaboração dos novos elementos estruturais.

Tratamentos	Descrição	Dimensões dos corpos de prova
1	Viga tipo "I" com mesa de <i>Eucalyptus</i>	74,9 x 59,1 x 76,9 mm ³
2	Elemento cheio com mesa de <i>Eucalyptus</i>	60,1 x 74,8 x 79,8 mm ³
3	MLC de <i>Pinus</i>	60,7 x 74,8 x 79,6 mm ³
4	MLC de <i>Eucalyptus</i>	60,7 x 74,8 x 79,6 mm ³
5	Viga tipo "I" com mesa de <i>Pinus</i>	74,9 x 59,1 x 76,9 mm ³
6	Elemento cheio com mesa de <i>Pinus</i>	60,1 x 74,8 x 79,8 mm ³

Elemento cheio: alma da viga preparada com elementos tipo OSL unidos resorcinol formaldeído. O painel tipo OSL colado aos pares foram utilizados na alma da viga tipo "I". Dimensões dos corpos de prova: comprimento, largura e espessura, respectivamente.

Fonte: O Autor (2025).

As resinas utilizadas nos tratamentos foram fenol-formaldeído na fabricação do painel *Oriented Strand Lumber* – OSL (madeira de pinus), e na junção da mesa de eucalipto e pinus com o painel OSL, empregou-se resorcinol formaldeído, assim como foi aplicado na MLC para ambas as espécies madeireiras utilizadas. Os elementos produzidos foram encaminhados para a marcenaria localizada nas instalações do Departamento, onde, utilizando uma serra circular, foram dimensionados seis corpos de prova por tratamento, totalizando 36 amostras, cujas essas dimensões, estavam

em conformidade com as especificações da *American Institute of Timber Construction* (AITC, 2007) (Tabela 1 e Figura 4).

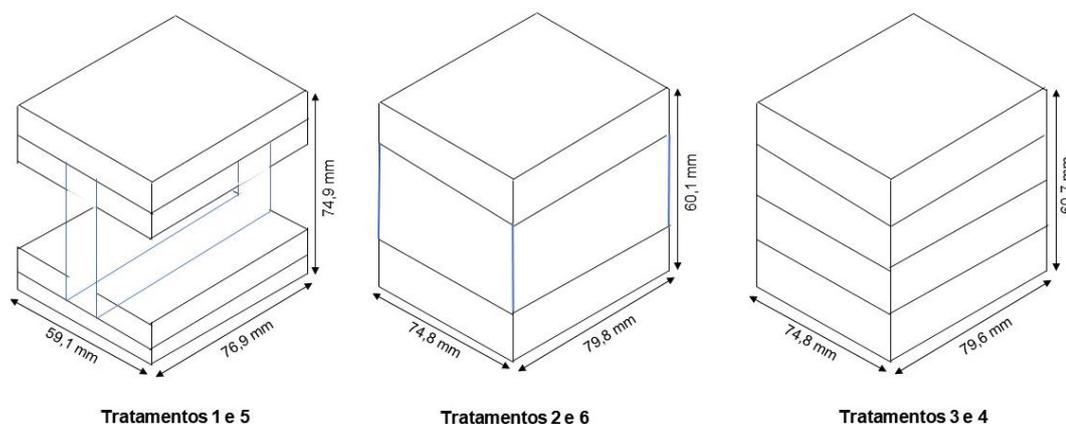


Figura 4 – Esquema ilustrativo para demonstração dos corpos de prova utilizados no ensaio de delaminação.

Fonte: O Autor (2025).

Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a um processo de climatização, mantendo-se em condições de umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura de $25 \pm 3^\circ \text{C}$ até atingirem o equilíbrio higroscópico. Após esse processo, foi realizado o ensaio de delaminação.

4.2 Ensaio de delaminação

O ensaio de delaminação foi conduzido de acordo com as diretrizes estabelecidas pela AITC T110 (2007), que aborda a avaliação de adesivos para uso estrutural em produtos de madeira expostos a condições externas. O procedimento consistiu na exposição dos corpos de prova a ciclos de umedecimento e secagem, sujeitos a tensões devido ao efeito de vácuo e pressão, com duração de 12 dias e repetição do ciclo de umedecimento e secagem por três vezes. Para a realização do ensaio, foi utilizado um sistema composto por uma autoclave com dimensões de 53 x 19,5 cm (comprimento e diâmetro), equipada com um compressor capaz de gerar pressão de até 800 kPa, operando a 550 kPa, e uma bomba de vácuo com capacidade de 250 psi (equivalente a 1723,69 kPa), gerando um vácuo de pelo menos 22 inHg.

Os corpos de prova foram marcados na região da linha de cola com o auxílio de uma caneta permanente, a fim de facilitar a identificação de possíveis aberturas

nessa área durante o ensaio. As amostras foram dispostas na autoclave (Figura 5), separadas por espaçadores, para garantir que todas as superfícies de topo ficassem expostas à água. Para evitar que as amostras flutuassem, elas foram pressionadas para baixo com um peso adicional. A água a ser utilizada foi mantida a $22 \pm 5^\circ \text{C}$ e adicionada em quantidade suficiente para submergir completamente os corpos de prova (Calil Neto, 2011; Oliveira *et al.*, 2020).



Figura 5 – Detalhes do equipamento utilizado para o ensaio de delaminação.
Fonte: O Autor (2025).

Na primeira etapa do ensaio, os corpos de prova na autoclave foram submetidos a um vácuo de $75 \pm 10 \text{ kPa}$ por 2 horas. Após a liberação do vácuo, aplicou-se água sob pressão de $540 \pm 20 \text{ kPa}$ por 2 horas. Esse ciclo foi repetido durante a segunda etapa, totalizando 8 horas na autoclave. Após essa fase, as amostras foram retiradas da autoclave e mantidas em condições ambientais por 96 horas.

Nos ciclos subsequentes (segundo e terceiro), os procedimentos descritos foram repetidos. Ao término do ensaio, foi realizada a análise da combinação da MLC exposta ao ambiente externo, por meio da medição da porcentagem de delaminação nas faces superiores dos corpos de prova.

Após a conclusão dos ensaios na autoclave, as amostras de aproximadamente 75 mm de comprimento foram expostas ao ar livre por 36 horas, a uma temperatura de $28 \pm 2^\circ \text{C}$, com o objetivo de reduzir seu peso em até 5-6% do peso inicial. A delaminação total das linhas de cola não deve exceder 10% do comprimento total, para que o MLC seja aprovado para uso externo (AITC T110, 2007). Ao final do ensaio, foi avaliado o comportamento das amostras, por meio do comprimento da

fenda obtida no processo de delaminação dividido pelo comprimento da linha de cola em cada tratamento. Foi determinada a porcentagem nas duas faces dos corpos de prova, chamadas de Lado A (superior) e Lado B (inferior).

4.3 Análise dos dados

O estudo foi estruturado em delineamento inteiramente casualizado (DIC). O teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para verificação da normalidade e o de Levene para homogeneidade de variâncias. Para os fatores significativos pelo teste de F da análise de variância (ANOVA), utilizou-se o teste de Scott-Knott a 5% de nível de significância para comparação entre tratamentos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

É evidente a disparidade nos resultados de delaminação entre os tratamentos, refletindo a influência das diferentes combinações de materiais e configurações estruturais sobre a resistência da linha de cola em condições extremas. Não houve diferença significativa entre os tratamentos 2 e 6 ($F > 0,05$), ambos elementos cheios com mesa composta por espécies diferentes (Tabela 2). A espécie não influenciou a delaminação devido à homogeneidade das espécies usadas nos tratamentos e à configuração estrutural das mesas compostas. Além disso, fatores como adesivo e processo de colagem, podem ter tido maior impacto na resistência da linha de cola do que as diferenças entre as espécies.

Tabela 2 – Delaminação dos corpos de prova por tratamento.

Tratamentos	Lado A (%)	Lado B (%)	Média (%)
1	3,29 B (9,29)	0,00 B (0,00)	2,19 (7,70)
2	28,40 A (33,48)	38,05 A (34,18)	33,22 (33,82)
3	7,11 B (20,80)	6,22 B (13,76)	6,66 (17,45)
4	10,89 B (26,42)	14,02 B (24,72)	12,46 (25,22)
5	0,00 B (0,00)	3,64 B (12,61)	1,21 (7,28)
6	30,89 A (34,93)	45,86 A (34,45)	38,38 (35,14)

Lado A: superior; Lado B: inferior. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical não diferem estatisticamente (Scott-Knott, $p > 0,05$). Tratamento 1: viga tipo "I" com mesa de *Eucalyptus*; tratamento 2: Elemento cheio com mesa de *Eucalyptus*; tratamento 3: MLC de *Pinus*; tratamento 4: MLC de *Eucalyptus*; tratamento 5: Viga tipo "I" com mesa de *Pinus*; tratamento 6: Elemento cheio com mesa de *Pinus*.

Fonte: O Autor (2025).

Para o Lado A (superior), o tratamento 6 apresentou a maior delaminação (30,89%) em relação aos demais tratamentos, seguido pelo tratamento 2 que apresentou delaminação de 28,40%, conforme a figura X. Esses valores são significativamente superiores aos observados nos demais tratamentos, indicando maior suscetibilidade à separação das camadas superiores, que por sua vez, recebem cargas, o que resulta na tração que ocorre por compressão.

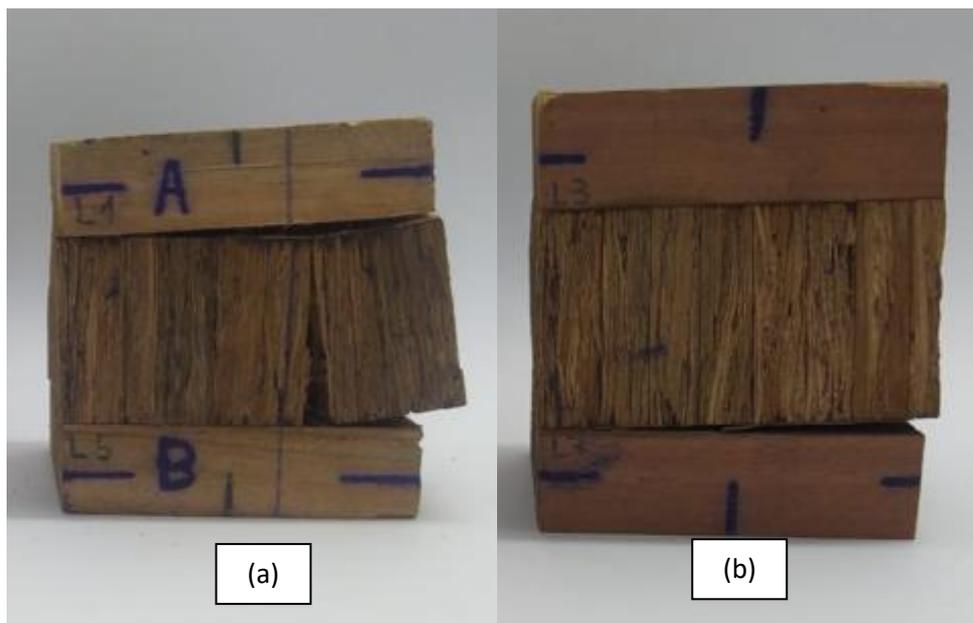


Figura 6: Tratamentos 6 (a) e 2 (b) após o ensaio de delaminação.
Fonte: O autor (2025).

Os tratamentos 1 e 5 demonstraram delaminação nula ou muito reduzida para o lado A, 3,29% e 0,00%, respectivamente, sugerindo uma linha de cola mais resistente ou condições que favoreçam menor impacto no lado superior, conforme a figura 7. A performance superior dos tratamentos 1 e 5 pode ser atribuída ao tipo de adesivo empregado (resorcinol formaldeído) ou à configuração geométrica da viga tipo "I", que potencialmente distribui melhor as tensões ao longo das camadas.

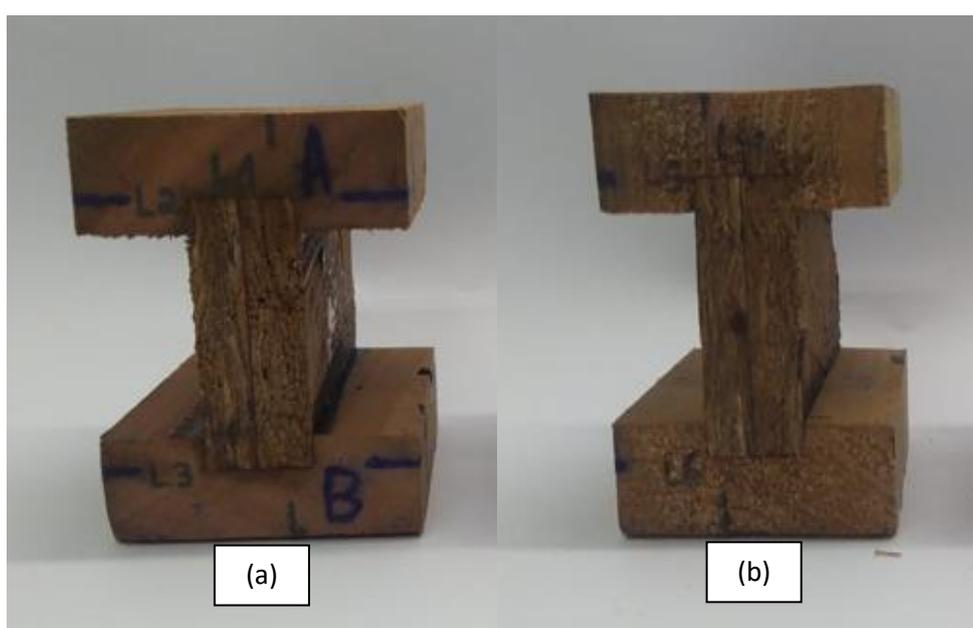


Figura 7: Tratamentos 1 (a) e 5 (b) após o ensaio de delaminação.
Fonte: O autor (2025).

Ao se tratar do Lado B (inferior), o tratamento 6 também apresentou a maior delaminação (45,86%), superando o tratamento 2 (38,05%). Esses valores indicam que a combinação de materiais e adesivos utilizados nesses tratamentos oferecem menor resistência às tensões presentes na face inferior, isso também pode estar relacionado a maior quantidade de adesivo no sistema. Por outro lado, os tratamentos 1 e 5 mantiveram os menores valores de delaminação, reforçando a hipótese de que a configuração estrutural dessas vigas contribui para a integridade da linha de cola, mesmo em condições adversas.

A média geral dos valores confirma a superioridade dos tratamentos 1 e 5 (2,19% e 1,21%, respectivamente) em termos de resistência à delaminação. Por outro lado, os tratamentos 2 e 6 apresentaram as maiores médias (33,22% e 38,38%, respectivamente), indicando limitações na linha de cola que comprometem a utilização desses elementos em condições que exijam alta durabilidade estrutural. Vale ressaltar, que a quantidade de adesivo aplicada no sistema influencia nos resultados. Valores superiores a 10% para delaminação são considerados críticos, pois reforçam que os tratamentos 2, 4 e 6 não atenderam ao limite máximo permitido para uso externo segundo a norma AITC T110 (2007).

A delaminação excessiva compromete a integridade estrutural e a durabilidade do produto, tornando-o inadequado para aplicações em ambientes externos, onde a exposição a condições climáticas adversas é constante (Segundinho *et al.*, 2018). Esses elevados índices de delaminação podem levar a falhas prematuras nas estruturas, limitando o uso da madeira engenheirada em aplicações críticas, como construções e obras expostas a umidade e variações térmicas (Fiorelli; Dias, 2005).

Os resultados são consistentes com outros estudos que avaliam a influência do tipo de adesivo e da configuração estrutural na resistência à delaminação em MLC. Fiorelli e Dias (2005), ao investigarem a eficiência de adesivos em vigas lamelada, observaram que adesivos à base de resorcinol apresentam excelente desempenho em condições de alta umidade, o que pode explicar a baixa delaminação nos tratamentos 1 e 5, onde o adesivo resorcinol foi aplicado.

Os autores Segundinho *et al.* (2017) destacaram que a combinação de espécies de madeira de alta densidade com adesivos de maior resistência, como o fenol-formaldeído, tende a melhorar o desempenho mecânico, especialmente em aplicações sujeitas a variações ambientais. Isso corrobora com os resultados positivos

obtidos nos tratamentos que empregaram *Eucalyptus* como componente principal da mesa, como nos tratamentos 1 e 4.

Outro ponto relevante é a análise efetuada por Pereira (2014), que enfatiza a importância da configuração geométrica das vigas. O Autor detalhou como a geometria das vigas afeta a distribuição de tensões durante a aplicação de esforços, observando que o formato tipo "I" facilita a distribuição mais eficiente das cargas, comparado a outras configurações geométricas. Ele concluiu que, com a configuração correta da viga e a distribuição adequada de tensões, os índices de delaminação foram significativamente menores, evidenciando que a geometria das vigas tem um papel crucial na durabilidade e resistência das estruturas madeireiras laminadas.

Por outro lado, os tratamentos 2 e 6 apresentaram delaminações excessivas, o que pode ser relacionado à menor compatibilidade entre o adesivo e as características das partículas de madeira utilizadas no núcleo OSL, como indicado por Bustos *et al.* (2003). Essas partículas, ao apresentarem maior variabilidade dimensional e propriedades físico-químicas distintas, podem comprometer a eficiência do adesivo, resultando em falhas interfaciais mais frequentes.

Em relação aos valores elevados de delaminação observado no lado B para os tratamentos 2 e 6, sugere-se que as condições impostas pelo ensaio, como ciclos de umedecimento e secagem, podem intensificar a tensão e favorecer a separação das camadas inferiores, possivelmente devido à maior exposição à água acumulada ou às diferenças na adesão causada pela pressão aplicada durante a fabricação (Segundinho *et al.*, 2013).

No tratamento 6, o Lado B apresentou 45,86% de delaminação, enquanto o lado A registrou 30,89%, representando um aumento significativo da delaminação na face inferior. Esses valores indicam uma clara limitação da linha de cola em suportar condições extremas de ensaio, especialmente em regiões inferiores, onde a carga é mais distribuída e as tensões são mais equipadas. Da mesma forma, no tratamento 2, o lado B exibiu uma delaminação superior (38,05%) em relação ao lado A (28,40%), reforçando a hipótese de que as condições do núcleo OSL podem influenciar níveis de resistência das juntas coladas, especialmente em regiões mais expostas à umidade e ciclos de pressão (Calil Neto, 2011).

Para os demais tratamentos (1, 3, 4 e 5), ambos os lados foram ajustados, sendo a delaminação inferior a 5% para os dois lados. Essa estabilidade indica que a configuração das vigas tipo "I" e o uso de adesivo resorcinol são altamente eficazes

para minimizar a delaminação em ambas as faces. A distribuição homogênea das camadas e a qualidade da linha de cola nesses tratamentos justificam esse desempenho.

Adesivos à base de resorcinol têm alta resistência a condições ambientais adversas, como ciclos de umidade e secagem (Frihart, 2005). Isso explica o baixo índice de delaminação aplicado nos tratamentos 1 e 5, nos quais o resorcinol foi utilizado nas mesas de madeira. Esses adesivos formam ligações químicas fortes com a madeira, o que reduz significativamente a ocorrência de falhas. Pois formam ligações covalentes fortes com a madeira, utilizando grupos hidroxila que reagem com a celulose e hemicelulose. Essas ligações garantem alta resistência a umidade e temperatura, reduzindo a delaminação e aumentando a durabilidade da linha de cola, especialmente em condições ambientais adversas (Frihart, 2005).

A orientação das fibras e a pressão exercida durante a aplicação afetam a homogeneidade da linha de cola (Fiorelli; Dias, 2005). No lado inferior (B), a exposição à água em maior proporção pode intensificar a penetração e, em condições de secagem, geram perdas adicionais, resultando em maior delaminação, como aplicado nos tratamentos 2 e 6. As perdas adicionais ocorrem devido ao inchaço das fibras pela água, o que dilui o adesivo e compromete a aderência. Isso gera penetração desigual do adesivo, perda de coesão e tensões internas durante a secagem, resultando em maior delaminação e falhas na linha de cola (Gomes *et al.*, 2015).

Trabalhos como o de Bustos *et al.* (2003) e Zhang e Lu (2014) destacam que materiais lignocelulósicos reconstituídos, como o OSL, apresentam uma interface adesiva mais heterogênea, que pode comprometer a resistência da linha de cola. Essa característica é consistente com os resultados do tratamento 6, onde o núcleo do OSL apresentou alta delaminação.

O baixo índice de delaminação nos tratamentos 1 e 5 pode ser explicado pela eficiência estrutural das vigas tipo "I", que distribuem melhor as tensões, pela alta qualidade do adesivo, como o resorcinol, que forma ligações químicas fortes com a madeira, e pelas propriedades da madeira, como maior densidade e uniformidade. Além disso, a metodologia de colagem, que inclui aplicação controlada de adesivo e cura adequada, também contribuiu para a uniformidade da linha de cola, resultando em maior resistência e menor delaminação. Esses fatores combinados garantiram um desempenho superior (Araújo *et al.*, 2020).

Os resultados obtidos revelaram diferenças significativas na resistência à delaminação entre os tratamentos avaliados, destacando a superioridade dos adesivos à base de resorcinol em configurações estruturais específicas, como as vigas tipo "I". Por outro lado, as altas taxas de delaminação observadas nos tratamentos com núcleo OSL evidenciam limitações no desempenho desses elementos em condições extremas. Esses resultados ressaltam a importância da otimização da combinação entre materiais e adesivos para garantir maior durabilidade e desempenho estrutural, contribuindo para a validação técnica e o fortalecimento do uso de elementos de madeira lamelada colada como alternativas sustentáveis e eficazes na construção civil.

6 CONCLUSÕES

Os tratamentos que utilizaram adesivo à base de resorcinol, especialmente em vigas tipo "I", apresentaram desempenho superior, com valores de delaminação inferiores aos limites normativos estabelecidos. Os elementos que empregaram núcleo de partículas OSL apresentaram maiores taxas de delaminação, culminando em limitações no desempenho desses materiais em condições extremas.

Os resultados reforçam a importância da escolha criteriosa de materiais e adesivos, além da otimização de configurações estruturais, para maximizar a durabilidade e o desempenho mecânico de elementos de madeira lamelada colada. Recomenda-se a continuidade de estudos que explorem melhorias nos processos de fabricação, ampliando a aplicabilidade e a competitividade dos elementos avaliados no mercado da construção civil.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, D. L.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; JANKOWSKY, L. *et al.* Evaluation of the oriented strand board properties produced using tropical wood mixtures. **Forests**, v. 14, 2023. <https://doi.org/10.3390/f14112143>
- ALVES, M. A.; RODRIGUES, E. M.; VIEIRA, D. C.; PINTO, V. T.; ROCHA, L. A. O.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Verificação de modelo computacional para placas com enrijecedores do tipo viga-caixão submetidas à carga transversal uniformemente distribuída. **Scientia Plena**, v. 19, n. 11, 2023. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2023.119914>
- AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC T110 - Test methods for structural glued laminated timber - Cyclic delamination test**. Centennial, CO, 2007.
- ARANTES, L. S.; FURTINI, A. C. C.; MOREIRA, R. G.; GOMES, D. A. C.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Avaliação de painéis sanduíche produzidos com núcleo de caixas de ovos e lâminas de paricá. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 2, p. 121-130, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000200666>
- ARAÚJO, V. A.; BIAZZON, J. C.; MORALES, E. A. M.; BARBOSA, J. C.; GAVA, M.; GARCIA, J. N. Materiais lignocelulósicos em uso pelo setor produtivo de casas de madeira no Brasil. **Revista do Instituto Florestal**, v. 32, n. 2, p. 129-141, 2020. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.202032202>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira**. Seção 7, Rio de Janeiro. 2012, p. 107.
- BAKALARZ, M. M.; KOSSAKOWSKI, P. G. Numerical analysis of laminated veneer lumber beams strengthened with various carbon composites. **Polymers**, v. 16, n. 12, 2024. <https://doi.org/10.3390/polym16121697>
- BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ANDRADE, B. J.; GOMES, R. M.; ARAÚJO, S. O.; SOUZA, E. C. Improving the understanding of wood bonding: Behavior of different adhesives on the surface of *Eucalyptus* and pine wood. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 112, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102987>
- BRITO, F. M. S.; SILVA, B. A.; CARVALHO, I. M.; BAÚTI, S. B.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Technological properties of Medium Density Particleboards produced with peanut (*Arachis Hypogaea*) and *Pinus Oocarpa* Hulls. **Floresta e Ambiente**, v. 29, n. 2, 2022. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0101>
- BUSTOS, C.; BEAUREGARD, R.; MOHAMMAD, M.; HERNÁNDEZ, R. E. Structural performance of finger-jointed black spruce wood lumber with different joint configurations. **Forest Products Journal**, v. 53, n. 9, p. 72-76, 2003.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 124 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

CRAWLEY, N. **Cross laminated timber: a design stage primer**. RIBA Publishing, Londres, 2021. 216 p.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Avaliação da delaminação em peças de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro. **Revista Matéria**, v. 10, n. 2, p. 241-249, 2005.

FOGAÇA, A. C. **Impactos da construção civil no meio ambiente e práticas sustentáveis**. 2024. 31 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, RS, 2024.

FPIInnovations. **CLT handbook: Cross-laminated timber**. In: Cagnon, S.; Pirvu, C. (ed). Special Publication n. SP-528E. Québec, QC: FPIInnovations, 2011. 626 p.

FRIHART, C. R. **Wood adhesion and adhesives: handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC, 2005.

GOMES, N. B.; JARDIM, P. I. L. G.; CHRISTOFORO, A. L.; SOUZA, A. J. D.; MOLINA, J. C. Análise dos parâmetros de fabricação de elementos de madeira lamelada colada na resposta da qualidade de colagem com base na NBR 7190-6. **Ambiente Construído**, v. 25, 2025. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212025000100786>

GUMOWSKA, A.; KOWALUK, G. Physical and mechanical properties of high-density fiberboard bonded with bio-based adhesives. **Forests**, v. 14, n. 84, 2023. <https://doi.org/10.3390/f14010084>

HARA, M. M. **Caracterização de adesivos para madeira produzidos pela reciclagem do poliestireno**. 2024. 81 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2024.

HASAN, K. M. F.; BAK, M.; AHMED, A. A. O.; GARAB, J.; HORVÁTH, P. G.; BEJÓ, L.; ALPÁR, T. Laminated strand lumber (LSL) potential of Hungarian and Central European hardwoods: a review. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 82, p. 245–264, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-02019-1>

HELIODORO, J. C. A. **Preservação de painéis compensados: estudo comparativo de processos, produtos e desempenhos**. 2021. 132 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP, 2021.

HEMMILA, V.; ADAMOPOULOS, S.; KARLSSON, O.; KUMAR, A. Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels. **RSC Advances**, v. 7, p. 38604-38630, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7RA06598A>

HUSSIN, M. H.; LATIF, N. H. A.; HAMIDON, T. S. *et al.* Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 21, p. 3909-3946, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.156>

ILLUYOMADE, T. D.; OKWANDU, A. C. Innovative materials in sustainable construction: A review. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 12, n. 1, p. 2435-2447, 2024. <https://doi.org/10.30574/ijsra.2024.12.1.1048>

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2024**. São Paulo, 2024. 64 p.

ISSA, C. A.; KMEID, Z. Advanced wood engineering: glulam beams. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 99-106, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.05.013>

JARECKI, W.; PALUBICKI, B.; WOLPIUK, M. *et al.* The optimization of the strength of wood adhesive joints supported by steel fasteners in furniture components. **Forests**, v. 15, n. 11, 2024. <https://doi.org/10.3390/f15111953>

KEFFER, J. F.; TRIANOSKI, R.; BEHLING, A.; KOEHLER, H. S.; IWAKIRI, S.; ZAMARIAN, E. H. C. Clustering of tropical species through multivariate analysis of the bonding properties of edge-glued panels (EGP). **Scientific Electronic Archives**, v. 17, n. 6, 2024. <http://dx.doi.org/10.36560/17620242016>

KIM, K. H.; LEE, H. M.; LEE, M. Evaluation of adhesive characteristics of mixed cross laminated timber (CLT) using yellow poplar and softwood structural lumbers. **J. Korean Wood Sci. Technol**, v. 52, n. 1, p. 58-69, 2024. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2024.52.1.58>

KOSSAKPWSKI, P. G. New advances in strengthening of structural timber. **Materials**, v. 17, n. 11, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17112545>

KUMAR, C.; LEGGATE, W. An overview of bio-adhesives for engineered wood products. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 118, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103187>

KWAI, L. L. **Tecnologias, conceitos e propostas de materiais de construção sustentável do centro de vivências da UNESP, Rio Claro/SP**. 2013. 70 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2013.

LANHE, D. G.; ISRAEL, C. L.; HAUPT, W. Improvement of gluing parameters in edge glued panels. **Maderas Ciencia y tecnologia**, v. 26, n. 22, p. 1-12, 2024. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.22>

LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M.; VALLE, I. M. R. O uso da madeira laminada colada no Brasil: panorama e desafios. *In*: Congresso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción, II, **Anais...** Buenos Aires, Argentina, 2017.

LI, C.; WANG, Q.; LAI, Z.; MU, J. One-step synthesis of novel nitrogen-doped biochar from N-rich waste straw particleboard for efficient Pb(II) adsorption. **Microchemical Journal**, v. 207, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.112206>

LIMA, A. M.; VIDAURRE, G. P.; LIMA, R. M.; BRITO, E. O. Utilização de fibras (epicarpo) de babaçu como matéria-prima alternativa na produção de chapas de madeira aglomerada. **Árvore**, v. 30, n. 4, p. 645-650, 2006.

MARTINS, T. V.; GOMIDE, L. R.; FERRAZ FILHO, A. C.; SILVA, P. R.; MELO, L. A. Mosaicos clonais de *Eucalyptus* no planejamento florestal e seus efeitos econômicos e produtivos. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 727-737, 2017. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n116.13>

MORAES, C. E. **Adesivos estruturais baseados em epóxi na indústria petroquímica: uma revisão**. 2021. 55 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2021.

OLIVEIRA, R. G. E.; GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G. A.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; CHAVES, I. L. S.; BRITO, A. S. Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* glulam. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v. 22, n. 4, p. 495-504. 2020. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000408>

ÖZÇİFÇİ, A.; YAPICI, F. Effects of machining method and grain orientation on the bonding strength of some wood species. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 202, n. 1/3, p. 353-358, 2008 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.043>

PEREIRA, M. C. M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada**. 2014. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014.

RAMACHANDRAREDDY, B.; HERWIJNEN, H. W. G. V.; BECK, G.; BREDESEN, R.; KONNERTH, J. Mechanical properties of wood adhesive bond lines tested in service classes according to Eurocode 5. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 118, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103233>

REIS, A. H. S.; SILVA, D. W.; VILELA, A. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Physical-mechanical properties of plywood produced with *Acrocarpus fraxinifolius* and *Pinus oocarpa*. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.015717>

REN, H.; BAHRAMI, A.; CEHLIN, M.; WALLHAGEN, M. Performance of innovative adhesive-free connections for glued-laminated timber under flexural load. **Structures**, v. 70, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107904>

RENZO, R. **Painel estrutural de lâminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* utilizando adesivo resorcinólico, tanino e poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2008. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2008.

ROMERO, A.; ODENBREIT, C. Experimental investigation on strength and stiffness properties of laminated veneer lumber (LVL). **Materials**, v. 16, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16227194>

SANTIAGO, S. B.; GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; SEGUNDINHO, P. G. A.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C. Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. **Matéria**, v. 23, n. 3, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0485>

SANTIS, Y.; ALOISIO, A.; PASCA, D. P.; FRAGIACOMO, M.; DOMBROWSKI, F. Evaluation of the shear size effect in glued laminated timber using a stochastic FE model calibrated on 17000 glue-line tests. **Construction and Building Materials**, v. 399, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132488>

SCIOMENTA, M.; VIHMAN, J. L.; TUHKANEN, E.; JUST, A.; FRAGIACOMO, M. The effects of timber species and adhesive type on the behavior of finger joints in tension under fire conditions. **Construction and Building Materials**, v. 448, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138080>

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Matéria**, v. 22, n. 2, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0140>

SEGUNDINHO, P. G. A.; SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Ciência da Madeira**, v. 9, n. 2, p. 123-133, 2018. <http://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p123-133>

SEGUNDINHO, P. G. A.; ZANGIÁCOMO, A. L.; CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; LAHR, F. A. R. Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm.). **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000300011>

SILVA, B. R. F.; UCELLA FILHO, J. G. M.; SOUZA, E. C. *et al.* Properties of cross-laminated timber bonded with an adhesive based on tannins from the bark of *Mimosa tenuiflora* trees. **Revista Árvore**, v. 46, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-908820220000020>

SILVA, M. L. J. S.; LOBO, M. V. F.; CUNHA, R. D. A.; CÉSAR, S. F. Viabilidade do uso de madeira clonal de *Eucalyptus urophylla* de rápido crescimento para produção de madeira lamelada colada (MLC) com adesivo poliuretano à base de mamona. **Matéria**, v. 28, n. 2, 2023. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0073>

SINGH, T.; ARPANAEI, A.; ELUSTONDO, D.; WANG, Y.; STOCCHERO, A.; OESTE, T. A. P.; FU, Q. Emerging technologies for the development of wood products towards extended carbon storage and CO₂ capture. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 4, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100057>

SVAJLENKA, J.; POSIVAKOVA, T. Innovation potential of wood constructions in the context of sustainability and efficiency of the construction industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 411, 2023.: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137209>

TIAN, W.; WANG, X.; YE, Y. *et al.* Recent progress of biomass in conventional wood adhesives: a review. **Green Chemistry**, v. 25, n. 24, p. 10304-10337, 2023. <https://doi.org/10.1039/d3gc03441k>

TOMÉ, K. T. **Análise do desempenho estrutural de vigas com perfil i em madeira colada, utilizando três diferentes tipos de adesivos**. 2022. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2022.

VITO JUNIOR, A. F.; VICENTE, W. M. Innovative approach for enhancing Glulam Performance with reinforcing steel bars: a beso-based study. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 20, n. 6, 2023. <https://doi.org/10.1590/1679-78257558>

XIONG, X.; MA, Q.; REN, J. The Performance optimization of oriented strand board veneer technology. **Coatings**, v. 10, n. 511, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings10060511>

YADAV, R.; KUMAR, J. Engineered wood products as a sustainable construction material: A review. Chapters, in: Gong, M. (ed.), **Engineered Wood Products for Construction**, 2021. <http://doi.org/10.5772/intechopen.99597>

YOUNIS, A.; DODOO, A. Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview. **Journal of Building Engineering**, v. 52, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104482>

YU, C.; CHEN, Y.; LI, R.; JIANG, J.; WANG, X. A narrative review: modification of bio-based wood adhesive for performance improvement. **Coatings**, v. 14, n. 9, 2024. <https://doi.org/10.3390/coatings14091153>

ZANGIÁCOMO, A. L.; LAHR, F. A. R. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 9, n. 40, p. 103-131, 2007.

ZHANG, H.; LU, X. Modeling of the elastic properties of laminated strand lumber. **Wood Research**, v. 59, n. 1, p. 1-10, 2014.