

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Instituto de Ciências e Engenharia - Campus de Itapeva

JOÃO PAULO KULIK LAPENNA

**CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS DENTES DE EMENDAS FINGER JOINT
EM MADEIRA DE PINUS ELLIOTTII.**

Itapeva - SP

2026

JOÃO PAULO KULIK LAPENNA

**CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS DENTES DE EMENDAS FINGER JOINT
EM MADEIRA DE PINUS ELLIOTTII.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e
Engenharia, Itapeva, para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Industrial Madeireira.

Orientador(a): Prof. Dr. Alexandre Jorge
Duarte de Souza

Itapeva - SP

2026

L311c

Lapenna, João Paulo Kulik

Caracterização geométrica dos dentes de emendas finger joint em madeira de *Pinus elliottii* / João Paulo Kulik Lapenna. -- Itapeva, 2026
45 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Industrial - Madeira) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva

Orientador: Alexandre Jorge Duarte de Souza

1. Madeira. 2. *Pinus elliottii*. 3. Emenda dentada. 4. Propriedades mecânicas. 5. Sustentabilidade. I. Título.

JOÃO PAULO KULIK LAPENNA

**Caracterização geométrica dos dentes de emendas finger joint em
madeira de Pinus elliottii.**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial - Madeira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE JORGE DUARTE DE SOUZA**
Data: 08/05/2026 15:57:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL VILLAS BOAS**
Data: 13/05/2026 11:54:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2º Examinador: Prof. Dr. Daniel Villas Boas
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Documento assinado digitalmente
 **MURILO AUGUSTO VERISSIMO LEITE**
Data: 13/05/2026 12:14:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3º Examinador: Prof. Ms. Murilo Augusto Verissimo Leite
Engenheiro Industrial Madeireiro.

Itapeva, 28/04/2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao professor Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza, pela orientação, dedicação, paciência e pelas valiosas contribuições que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e disponibilidade foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Expresso também minha gratidão ao COPE Conecta, programa no qual fui bolsista no período entre 2023 e 2025, pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional, bem como pelo incentivo constante à pesquisa e à formação científica.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, oferecendo apoio, incentivo e motivação ao longo dessa trajetória.

“Produzir melhor é desperdiçar menos”

William McDonough

RESUMO

O desempenho estrutural de emendas dentadas em elementos de madeira está diretamente associado tanto às propriedades do material quanto aos parâmetros geométricos e às condições do processo de fabricação. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência das características geométricas das emendas dentadas no comportamento mecânico, com ênfase na relação entre a área livre entre os dentes e a força de ruptura. Para isso, foram realizadas medições geométricas das emendas e utilizados ensaios mecânicos de ruptura e análises estatísticas descritivas e inferenciais. A normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro–Wilk e, em função dos resultados obtidos, utilizou-se a correlação de Spearman para investigar a relação entre as variáveis analisadas. Os resultados indicaram que o aumento da área livre entre os dentes não está associado à redução da força de ruptura, evidenciando a importância do controle geométrico durante a fabricação. A análise dos modos de falha revelou predominância de rupturas na região da emenda e próximas à região com defeitos. Com base nos dados experimentais, foi proposta uma recomendação de pressão de prensagem visando à melhoria do desempenho mecânico das emendas. Os resultados obtidos contribuem para a compreensão da interação entre geometria, processo industrial e resistência mecânica de emendas dentadas em madeira.

Palavras-chave: emenda dentada; madeira; geometria; resistência mecânica; processo industrial.

ABSTRACT

The structural performance of finger-jointed wood elements is directly associated with both the material properties and the geometric parameters and conditions of the manufacturing process. In this context, the present study aimed to evaluate the influence of the geometric characteristics of finger joints on mechanical behavior, with emphasis on the relationship between the free area between the teeth and the rupture force. For this purpose, geometric measurements of the joints were performed and mechanical rupture tests, as well as descriptive and inferential statistical analyses, were carried out. Data normality was assessed using the Shapiro–Wilk test and, based on the results obtained, Spearman’s rank correlation was applied to investigate the relationship between the analyzed variables. The results indicated that an increase in the free area between the teeth was not associated with a reduction in rupture force, highlighting the importance of geometric control during the manufacturing process. The analysis of failure modes revealed a predominance of ruptures in the joint region and near areas with defects. Based on the experimental data, a recommendation for pressing pressure was proposed in order to improve the mechanical performance of the joints. The results contribute to the understanding of the interaction between geometry, industrial process, and mechanical strength of finger joints in wood.

Keywords: finger joint; wood; geometry; mechanical strength; industrial process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhe da geometria dos dentes da emenda finger joint.	20
Figura 2 – Exemplo de corpo de prova antes (esquerda) e após (direita) o preparo para a análise geométrica da emenda finger joint.	23
Figura 3 – Exemplo de medição do passo entre dentes (Td) por meio do software ImageJ.	24
Figura 4 – Representação normativa dos parâmetros geométricos das emendas dentadas.	25
Figura 5 – Gráfico de dispersão (Área livre × Resistência).	34
Figura 6 – Gráfico Boxplot – Influência da área livre.	35
Figura 7 – Histograma da resistência.	36
Figura 8 – Ruptura na emenda do corpo de prova.	39
Figura 9 – Presença de defeitos nos corpos de prova.	39
Figura 10 – Defeitos naturais observados na região da emenda.	39
Figura 11 - Variação visual dos anéis de crescimento nos corpos de prova.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pressão de colagem das ligações de continuidade das lamelas.	18
Tabela 2 – Classificação dos corpos de prova.	21
Tabela 3 - Valores dos resultados do ensaio de flexão estática.	22
Tabela 4 - Parâmetros geométricos coletados das emendas finger joint dos corpos de prova.	28
Tabela 5 – Verificação normativa da espessura da ponta do dente.	30
Tabela 6 – Verificação normativa do Ângulo do flanco.	31
Tabela 7 – Verificação normativa da condição combinada.	32
Tabela 8 – Estatística descritiva dos parâmetros geométricos.	33
Tabela 9 – Estatística descritiva dos parâmetros geométricos.	33
Tabela 10 - Valores médios dos resultados do ensaio de flexão estática.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de prova
EMIC	Equipamento de ensaios mecânicos
MLC	Madeira Laminada Colada
NBR	Norma Brasileira
PUR	Poliuretano (adesivo estrutural)
UNESP	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

α_d	Ângulo de inclinação dos flancos do dente (graus)
b_d	Espessura da ponta do dente (mm)
$b_{d,lim}$	Espessura limite admissível da ponta do dente (mm)
CV	Coeficiente de variação (%)
$F_{m\acute{a}x}$	Força máxima aplicada no ensaio de flexão (N)
L_d	Comprimento do dente da emenda finger joint (mm)
MPa	Megapascal
N	Newton
p	Valor de significância estatística
t_d	Passo entre dentes da emenda finger joint (mm)
W	Estatística do teste de Shapiro–Wilk

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	USO HISTÓRICO DA MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	15
3.2	A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL	15
3.3	ORIGEM DOS DEFEITOS DA MADEIRA PARA USO ESTRUTURAL	16
3.4	TÉCNICAS DE UNIÃO EM MADEIRA	16
3.5	EMENDAS FINGER JOINT	17
3.6	IMPORTÂNCIA DAS EMENDAS DENTADAS NA MADEIRA ESTRUTURAL	17
3.7	GEOMETRIA DOS DENTES E PARÂMETROS NORMATIVOS	18
3.8	ADESIVOS ESTRUTURAIS	18
3.9	CONDIÇÕES DE COLAGEM E PRENSAGEM	19
3.10	ENSAIOS MECÂNICOS E ANÁLISE DE FALHAS	20
3.11	SUSTENTABILIDADE E REAPROVEITAMENTO DA MADEIRA	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS	21
4.2	ENSAIOS MECÂNICOS	22
4.3	PREPARO DAS AMOSTRAS	23
4.4	REGISTRO E PROCEDIMENTO DE ANÁLISE NO IMAGEJ	24
4.5	PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO NORMATIVA.	26
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS OBTIDOS	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DAS EMENDAS FINGER JOINT	29
5.1.1	Verificação normativa da espessura da ponta do dente	30
5.1.2	Verificação normativa do ângulo de inclinação dos flancos	31
5.1.3	Verificação normativa da condição combinada	32
5.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	33
5.2.1	Teste de normalidade (shapiro-wilk)	34
5.2.2	Análise estatística da área livre x tensão de ruptura	34
5.3	COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO COM MADEIRA MACIÇA	37
5.3.2	Discussão dos resultados comparativos	37
5.4	ANÁLISE DOS MODOS DE RUPTURA	39
5.5	VARIABILIDADE ANATÔMICA DA MADEIRA	41
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso da madeira na construção civil tem ganhado novo destaque, principalmente com o avanço de tecnologias que permitem maior aproveitamento do material e melhor desempenho estrutural. No Brasil, grande parte da madeira utilizada pela indústria vem de áreas de reflorestamento de espécies que apresentam rápido crescimento e ampla disponibilidade. Apesar dessas vantagens, a madeira de reflorestamento frequentemente apresenta características naturais que podem limitar sua aplicação estrutural, como presença de nós, rachaduras e tensões internas. Esses fatores tendem a reduzir os valores de resistência e rigidez das peças, além de gerar maior variabilidade nas propriedades mecânicas.

Para contornar essas limitações e melhorar o aproveitamento da matéria-prima, a indústria madeireira passou a utilizar diferentes técnicas de união entre elementos de madeira. Entre elas, destaca-se a emenda do tipo *finger joint*, amplamente empregada para unir peças curtas e permitir a produção de elementos estruturais com maiores dimensões. Esse processo consiste na usinagem de dentes nas extremidades das peças, que posteriormente são coladas com adesivos estruturais, formando um elemento contínuo.

Esse tipo de emenda é amplamente utilizado na fabricação de madeira laminada colada (MLC), sendo um dos principais métodos empregados para a união longitudinal das lamelas. Uma de suas principais vantagens está no aumento da área de colagem, o que favorece a transferência de esforços entre as peças e contribui para uma distribuição mais uniforme das tensões. Quando executadas em condições adequadas de fabricação, as emendas do tipo *finger joint* podem atingir um desempenho mecânico equivalente, ou até superior, ao da madeira maciça, além de possibilitar um melhor aproveitamento das partes de maior qualidade da madeira. Entretanto, o desempenho dessas emendas depende de diversos fatores relacionados tanto ao material quanto ao processo produtivo. Aspectos como a geometria dos dentes, o tipo de adesivo utilizado e a qualidade da colagem podem influenciar diretamente o comportamento mecânico da união. De modo geral, parâmetros como o ângulo, o comprimento e a profundidade dos dentes influenciam diretamente na distribuição dos esforços na região da emenda, o que pode impactar na sua resistência final.

Diante disso, este trabalho busca analisar as possíveis causas da baixa resistência mecânica observada em peças de madeira de *Pinus sp.* unidas por emendas do tipo finger joint.

Com isso, espera-se contribuir para a compreensão do comportamento mecânico das emendas finger joint em madeira de *Pinus sp.*, fornecendo informações que possam auxiliar no aprimoramento dos processos industriais de produção de elementos estruturais de madeira.

2 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Caracterizar geometricamente as emendas finger joint em peças de madeira, por meio da medição e análise dos principais parâmetros geométricos dos dentes, utilizando análise digital de imagens.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a conformidade dos parâmetros geométricos com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190-1:2022;
- Avaliar a influência da área livre da emenda finger joint sobre a resistência à flexão estática da madeira de *Pinus sp.*, por meio de análise estatística e correlação estatística não paramétrica.
- Analisar os modos de ruptura das amostras, identificando possíveis falhas associadas à geometria da emenda, à interface adesiva e à presença de defeitos naturais;
- Discutir a influência da variabilidade anatômica da madeira e da presença de nós no comportamento mecânico das emendas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 USO HISTÓRICO DA MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

A madeira vem sendo utilizada como material estrutural há muito tempo quando era utilizada na construção de cabanas e estruturas de proteções por povos antigos. Com o passar do tempo as técnicas e sistemas construtivos foram se consolidando e a utilização da madeira em elementos estruturais como pilares e vigas passou a ser combinada com elementos como alvenaria e pedra.

De acordo com Fletcher (1996), a consolidação da madeira como elemento estrutural se deu empiricamente a partir da observação do desempenho mecânico e da durabilidade das estruturas construídas. Sistemas construtivos tradicionais, como o enxaimel, evidenciam o elevado nível técnico alcançado mesmo antes da formalização dos conceitos de engenharia estrutural.

No Brasil, apesar da grande disponibilidade de espécies florestais e do uso tradicional da madeira em coberturas, pontes e edificações rurais, esse material durante muito tempo foi subvalorizado e frequentemente associado a construções de padrão técnico e econômico baixo. Porém, essa visão vem mudando nos últimos anos com o avanços da indústria madeireira no desenvolvimento de técnicas que aproveitam melhor o uso da madeira, como peças finger joint e painéis engenheirados, que mostram um maior grau de uniformidade, controle de dimensões e desempenho mecânico consistente.

3.2 A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

A madeira é amplamente utilizada na construção civil, principalmente por apresentar baixo peso próprio e bom desempenho mecânico, características que favorecem sua aplicação em elementos estruturais, como vigas, pilares e sistemas de cobertura (Calil Jr.; Lahr; Dias, 2003) . Quando proveniente de florestas plantadas, também apresenta vantagens relacionadas à disponibilidade e à padronização das espécies utilizadas.

Do ponto de vista estrutural, a madeira possui comportamento anisotrópico e heterogêneo, o que significa que suas propriedades mecânicas variam conforme a direção das fibras, a espécie e as condições de uso (Kollmann; Côté, 1968) . Por essa razão, torna-se necessário o estudo e a classificação das diferentes espécies, com base em valores característicos de resistência. Esse procedimento

permite que a madeira seja empregada com segurança em projetos estruturais, conforme os critérios de dimensionamento estabelecidos pela ABNT NBR 7190-1:2022.

3.3 ORIGEM DOS DEFEITOS DA MADEIRA PARA USO ESTRUTURAL

Os defeitos característicos da madeira são causados pelas variações naturais do crescimento das árvores, sendo diretamente influenciados pelas condições edafoclimáticas ao longo do desenvolvimento do lenho. Fatores como disponibilidade de água no solo, disponibilidade de nutrientes e temperaturas interferem diretamente na taxa de crescimento e na estrutura anatômica da madeira, resultando em alterações de densidade e proporção entre lenho inicial e tardio, o que favorece a ocorrência de defeitos como nós, inclinação das fibras, fendas e tensões internas.

Também o manejo florestal adotado ao longo do ciclo de produção exerce influência direta sobre a qualidade da madeira obtida. Segundo Auty e Achim (2023), as práticas de manejo intensivo podem alterar a uniformidade do lenho, enquanto Zhang, S *et al.* (2024) demonstram que a fertilização em excesso e o aumento acelerado da taxa de crescimento tendem a intensificar a heterogeneidade e a anisotropia da madeira, tendo como consequência redução nos valores de resistência mecânica da madeira. Por último, estudos demonstram que a interação entre fatores ambientais, práticas de manejo florestal e padrões de crescimento das árvores influencia diretamente a formação da madeira, podendo afetar sua qualidade, variabilidade estrutural e adequação para aplicações estruturais (Barrette; Achim; Auty, 2023).

3.4 TÉCNICAS DE UNIÃO EM MADEIRA

As uniões entre peças de madeira podem ser classificadas em dois grandes grupos: mecânicas, que utilizam parafusos, pregos ou chapas metálicas; e coladas, que recorrem a adesivos estruturais para formar uma junta contínua (Calil Jr.; Lahr; Dias, 2003). As uniões coladas apresentam vantagens significativas, como melhor distribuição de esforços, maior estanqueidade e estética aprimorada. Além disso, permitem a produção de componentes estruturais de grandes dimensões a partir de peças menores, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência do processo produtivo (Frihart, 2012). A evolução dos adesivos e das técnicas de colagem impulsionou o desenvolvimento de elementos engenheirados, como vigas laminadas coladas (glulam) e painéis estruturais. Entre essas inovações, destaca-se a emenda

finger joint, amplamente utilizada na recomposição de peças estruturais e na fabricação de produtos de madeira sólida reconstituída.

3.5 EMENDAS FINGER JOINT

A emenda do tipo finger joint consiste na união de duas peças de madeira por meio de entalhes em formato de “dentes”, que se encaixam perfeitamente e são colados com adesivo estrutural (Rapp; Militz, 2004). Essa técnica surgiu como uma solução para o aproveitamento de sobras de madeira e é hoje amplamente empregada na indústria madeireira e na construção civil. Quando corretamente executada, a junta pode atingir resistência igual ou superior à da madeira maciça (Nogueira; Lahr, 2002).

O desempenho da emenda depende de fatores como a precisão do encaixe, a geometria dos dentes, o tipo de adesivo e as condições de colagem. Estudos demonstram que falhas nesses parâmetros — especialmente na pressão e no tempo de prensagem — resultam em redução significativa da resistência à tração e ao cisalhamento (Iwakiri, 2005). Além disso, irregularidades na aplicação do adesivo podem gerar descontinuidades que comprometem a transferência de esforços entre as peças.

3.6 IMPORTÂNCIA DAS EMENDAS DENTADAS NA MADEIRA ESTRUTURAL

A madeira, embora seja um material natural de excelente desempenho mecânico, apresenta variações em suas propriedades devido à presença de defeitos como nós, rachaduras, inclinação de fibras e descontinuidades anatômicas. Esses defeitos reduzem a resistência mecânica e a confiabilidade estrutural, especialmente quando a peça é submetida a esforços de tração e flexão. Nesse contexto, as emendas do tipo *finger joint* — ou junta dentada — representam uma solução tecnológica eficiente para o aproveitamento racional da madeira, possibilitando a eliminação de regiões defeituosas e a união de segmentos com melhores propriedades estruturais (Pfeil, 2003).

O processo consiste na usinagem das extremidades das peças com perfis triangulares entrelaçados, que, ao serem colados, proporcionam grande área de contato e excelente transmissão de esforços longitudinais. Essa configuração confere ao produto final resistência comparável ou superior à da madeira maciça contínua, desde que sejam utilizadas colas estruturais adequadas e controladas as condições de

fabricação (Iwakiri, 2005; Calil Junior; Dias, 1997). Além de melhorar o desempenho mecânico, as emendas *finger joint* permitem o aproveitamento de peças curtas provenientes de desdobro ou resíduos de produção, reduzindo o desperdício de matéria-prima e contribuindo para a sustentabilidade do setor madeireiro (Souza *et al.*, 2019). Dessa forma, o uso dessa técnica favorece não apenas a padronização e a confiabilidade das peças estruturais, mas também o uso mais racional dos recursos florestais, alinhando-se aos princípios de economia circular e manejo sustentável.

3.7 GEOMETRIA DOS DENTES E PARÂMETROS NORMATIVOS

A geometria dos dentes da emenda exerce papel fundamental na resistência final da junta. Parâmetros como o comprimento dos dentes, o passo, a espessura na extremidade e o ângulo de inclinação influenciam diretamente o comportamento mecânico da ligação (ASTM D5572, 2020). Segundo a ABNT (2022), por meio da ABNT NBR 7190-1:2022, a conformidade geométrica deve seguir proporções específicas, garantindo que a redução de seção provocada pelos entalhes não ultrapasse 20% da resistência da madeira. Iwakiri (2005) destaca que a otimização desses parâmetros permite maior área de contato e melhor distribuição das tensões de cisalhamento, reduzindo a probabilidade de falhas adesivas. Por outro lado, geometrias inadequadas podem causar concentrações de tensão e desprendimento prematuro da junta.

3.8 ADESIVOS ESTRUTURAIS

O adesivo é o elemento responsável pela transmissão dos esforços entre as peças unidas, sendo determinante no desempenho da emenda. Entre os principais adesivos empregados na indústria madeireira estão a ureia-formaldeído (UF), a resorcinol-formaldeído (RF), o polivinil-acetato (PVA) e o poliuretano (PUR), cada um com propriedades químicas e mecânicas específicas (Frihart, 2009). Os adesivos à base de formaldeído são amplamente utilizados em ambientes secos e apresentam alta resistência mecânica, mas menor durabilidade em condições de umidade. Já o poliuretano se destaca pela flexibilidade, aderência e resistência à água, sendo apropriado para aplicações externas (Pizzi; Mittal, 2018). A escolha do adesivo deve, portanto, considerar as condições de serviço e o tipo de madeira empregada.

3.9 CONDIÇÕES DE COLAGEM E PRENSAGEM

As emendas dentadas são amplamente utilizadas em elementos estruturais de madeira colada por permitirem a continuidade das peças e a adequada transferência de esforços. O desempenho dessas ligações está diretamente relacionado às condições de colagem, especialmente à pressão aplicada durante o processo.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2022), por meio da ABNT NBR 7190-1:2022 – Projeto de estruturas de madeira estabelece que os entalhes múltiplos devem ser colados sob pressões definidas em função do comprimento do dente (L_d) e da densidade da madeira, conforme apresentado na Tabela 1 (ABNT, 7190-1:2022). A norma indica que dentes de menor comprimento exigem maiores pressões de colagem, enquanto dentes mais longos permitem a utilização de pressões menores, em função da maior área efetiva de contato.

Tabela 1 - Pressão de colagem das ligações de continuidade das lamelas

Ld (mm)	Pressão de colagem (MPa)	
	Densidade < 0,50 kg/m³	Densidade > 0,50 kg/m³
10	12	18
20	8	10
30	6	8
40	4,5	6,5
50	3	5
60	2	4

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

A densidade da madeira também influencia diretamente a pressão de colagem, sendo exigidos valores mais elevados para madeiras com densidade superior a $0,50 \text{ kg/m}^3$, devido à menor porosidade e maior rigidez do material (ABNT, 2022). Entretanto, a pressão aplicada não deve provocar fissuras longitudinais superiores a 5 mm, especialmente na região do fundo dos dentes, a fim de preservar a integridade da ligação.

Quanto ao processo de prensagem, a norma estabelece que devem ser seguidas as recomendações do fabricante do adesivo quanto ao tempo, temperatura e condições ambientais, sendo exigido tempo mínimo de prensagem de 2 segundos para entalhes múltiplos. O atendimento a esses critérios normativos é fundamental para garantir a qualidade das emendas e o desempenho estrutural dos elementos de madeira colada.

3.10 ENSAIOS MECÂNICOS E ANÁLISE DE FALHAS

Os ensaios mecânicos são indispensáveis para avaliar a eficiência das emendas coladas. Os testes mais comuns incluem ensaios de tração paralela às fibras, cisalhamento na linha de cola e flexão estática (ASTM D905, 2021). Tais procedimentos permitem quantificar a resistência da junta e identificar o modo predominante de falha — se adesiva (ruptura na linha de cola), coesiva (no adesivo) ou na madeira adjacente.

A análise do tipo de falha permite avaliar a qualidade da colagem. Quando a ruptura ocorre na própria madeira, entende-se que a ligação adesiva apresentou bom desempenho; por outro lado, quando a falha ocorre na interface, isso pode indicar problemas no processo de colagem, como pressão inadequada, tempo de prensagem insuficiente ou aplicação incorreta do adesivo.

3.11 SUSTENTABILIDADE E REAPROVEITAMENTO DA MADEIRA

A utilização de emendas finger joint também está associada ao conceito de sustentabilidade, uma vez que permite o aproveitamento de pequenas peças e resíduos da indústria madeireira, reduzindo o desperdício de matéria-prima e aumentando o rendimento no processamento da madeira. Esse processo contribui para a economia circular, transformando sobras em produtos de alto valor agregado e prolongando o ciclo de vida da madeira (FAO, 2021).

O uso racional dos resíduos madeireiros constitui uma estratégia importante para a sustentabilidade do setor, reduzindo os impactos ambientais e melhorando o aproveitamento da matéria-prima. Assim, a combinação de tecnologia, normatização e boas práticas de fabricação favorece a consolidação da madeira colada como uma solução estrutural moderna, eficiente e sustentável (FAO, 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consistiu no estudo de corpos de prova submetidos a análise geométrica associada à ensaios mecânicos dos corpos de prova. Para isso, foram utilizadas técnicas de processamento e medição de imagens digitais, permitindo a caracterização detalhada das regiões de colagem.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para realizar a análise foram utilizados corpos de prova de madeira de *Pinus Elliottii* spp., unidos por emendas do tipo finger joint, coladas com adesivo estrutural poliuretano (PUR), da marca Tuermerleim (BASF). A Figura 1 apresenta um corpo de prova utilizado nos ensaios, no qual se destaca a região da emenda finger joint analisada ao longo deste estudo.

Figura 1 – Detalhe da geometria dos dentes da emenda finger joint.



Fonte: Autor (2026).

Foram avaliados 20 corpos de prova, confeccionados com madeira seca e colados, preparados conforme os procedimentos adotados para os ensaios mecânicos.

A nomenclatura adotada para os corpos de prova foi definida com base nos diferentes grupos experimentais considerados ao longo dos ensaios. As siglas associadas a cada amostra indicam variações nas condições de preparação do material, como aspectos relacionados à secagem, ao tratamento e ao processo de colagem. No entanto, essas variações não constituem o foco principal deste estudo, uma vez que a análise foi direcionada à caracterização da geometria das emendas e ao seu comportamento mecânico. Dessa forma, a identificação dos corpos de prova foi mantida principalmente para fins de organização e para permitir a relação direta com os anexos dos ensaios realizados na máquina EMIC. As características gerais dos corpos de prova encontram-se descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos corpos de prova

Descrição	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)
CP 1 SF	720	43.03	38.17
CP 2 SE	720	39.16	41.67
CP 2 SF	720	36.81	43.58
CP 3 SF	720	36.81	44.07
CP 5 SF	720	38.17	44.23
CP 6 SE	720	39.02	43.18
CP 7 SE	720	38.42	43.41
CP 7 SF	720	39.03	43.79
CP 8 SF	720	37.90	43.48
CP 9 SE	720	38.86	43.65
CP 9 SF	720	38.43	43.55
CP 10 SE	720	39.02	43.74
CP 1 C	720	36.66	41.51
CP 1 SA	720	38.67	44.69
CP 1 SD	720	38.96	44.58
CP 2 SA	720	38.96	42.13
CP 5 SB	720	37.79	44.99
CP 6 SA	720	39.15	44.38
CP 6 SB	720	38.05	44.45
CP 10 SA	720	39.05	42.05

Fonte: Autor (2026).

4.2 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC, instalada no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Madeira da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Itapeva. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão com quatro apoios, conforme procedimentos compatíveis com as recomendações da ABNT NBR 7190-1:2022 – Projeto de Estruturas de Madeira. Os resultados obtidos foram registrados na Tabela 3 e serviram como base para a análise comparativa com os parâmetros geométricos das emendas finger joint.

Tabela 3 - Valores dos resultados do ensaio de flexão estática

Descrição	Fmáx (N)	Tensão de ruptura (MPa)
CP 1 SF	2909.70	33.42
CP 2 SE	3435.92	38.71
CP 2 SF	1661.21	20.03
CP 3 SF	2641.43	31.85
CP 5 SF	1888.21	21.10
CP 6 SE	3229.56	35.37
CP 7 SE	2373.16	26.67
CP 7 SF	3270.83	35.30
CP 8 SF	1454.85	16.77
CP 9 SE	2104.89	22.99
CP 9 SF	4312.95	48.28
CP 10 SE	2981.92	32.24
CP 1 C	2765.24	35.69
CP 1 SA	3250.19	35.02
CP 1 SD	2651.74	28.22
CP 2 SA	3910.55	44.03
CP 5 SB	3497.83	39.20
CP 6 SA	4312.95	45.65
CP 6 SB	3951.82	44.21
CP 10 SA	3095.42	34.76

Fonte: Autor (2026).

4.3 PREPARO DAS AMOSTRAS

Após a realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova foram seccionados e passaram por um preparo superficial, com o objetivo de expor a geometria das emendas dentadas e a interface madeira–adesivo (Figura 2). O preparo foi realizado na serraria da UNESP - Campus de Itapeva, utilizando a plaina desengrossadeira. Esse procedimento permitiu a remoção do excesso de adesivo e irregularidades superficiais, garantindo superfícies planas e adequadas para a análise digital, sem alterar as características originais da emenda.

Figura 2 – Exemplo de corpo de prova antes (esquerda) e após (direita) o preparo para a análise geométrica da emenda finger joint.



Fonte: Autor (2026).

4.4 REGISTRO E PROCEDIMENTO DE ANÁLISE NO IMAGEJ

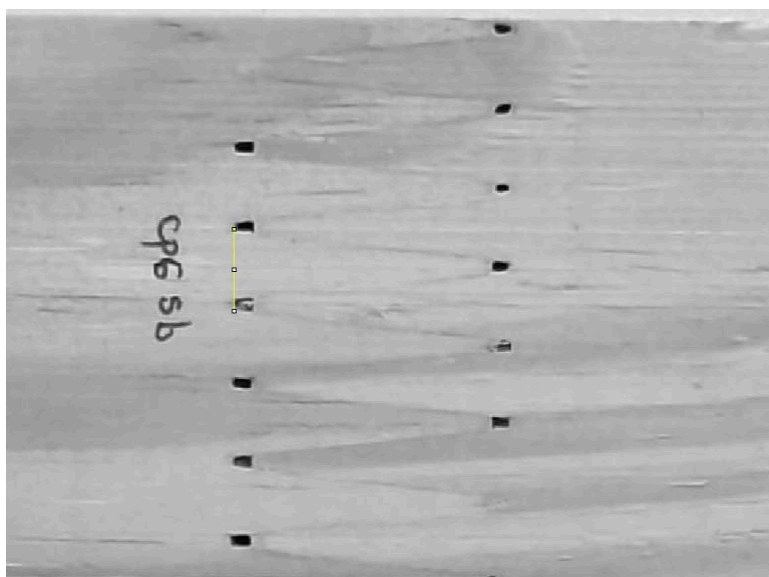
A análise geométrica das emendas *finger joint* foi realizada utilizando a versão online do software ImageJ (ImageJ Web – versão 1.53), a partir de imagens digitais obtidas por meio de câmera de telefone celular de alta resolução. As fotografias foram registradas com o plano da lente perpendicular à superfície da emenda, buscando evitar variações e erros de medição, utilizando a câmera de um smartphone com resolução de 16 MP.

O protocolo de medição adotado foi fundamentado nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190-1:2022, no que se refere aos parâmetros geométricos de emendas dentadas para madeira estrutural.

Inicialmente, as imagens foram importadas para o software e submetidas à calibração dimensional. Para isso, utilizou-se a ferramenta de linha reta para demarcar um segmento correspondente ao previamente medido no corpo de prova. Esse valor foi inserido no comando *Set Scale*, definindo a unidade de medida em milímetros e assegurando que todas as medições subsequentes fossem realizadas em escala real.

Após a calibração, a imagem foi convertida para o formato 8-bit, permitindo melhor distinção dos contornos geométricos dos dentes. As medições lineares e angulares foram realizadas diretamente sobre a imagem calibrada nesse formato, conforme exemplificado na figura 3, a seguir:

Figura 3 – Exemplo de medição do passo entre dentes (T_d) por meio do software ImageJ.



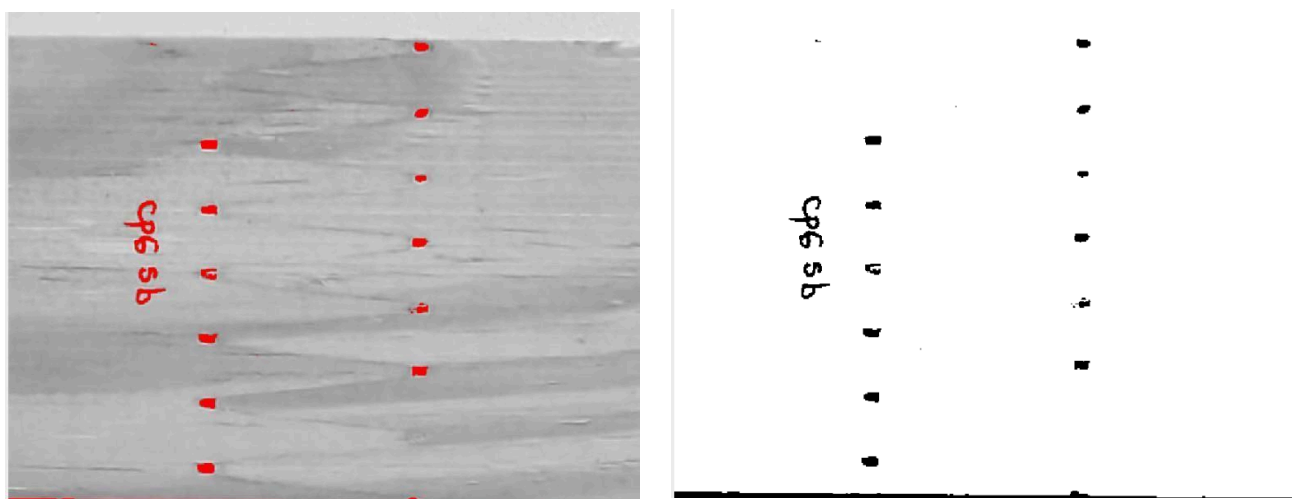
Fonte: Autor (2026).

Para padronização e maior confiabilidade dos resultados, foram desconsiderados os dentes localizados nas extremidades da emenda, por apresentarem maior suscetibilidade a irregularidades decorrentes do processo de usinagem ou da ruptura no ensaio mecânico. Assim, foram analisados exclusivamente os três primeiros dentes íntegros do lado esquerdo da emenda, mantendo-se essa orientação para todas as amostras avaliadas. A determinação dos parâmetros geométricos seguiu os critérios normativos da ABNT NBR 7190-1:2022.

Todas as medições foram realizadas individualmente nos três dentes selecionados de cada corpo de prova, sendo posteriormente calculada a média aritmética dos valores obtidos, garantindo representatividade e padronização dos parâmetros geométricos analisados.

Após a realização das medições lineares e angulares, realizou-se o ajuste de limiar (*Threshold*) exclusivamente para a determinação das áreas das regiões de interesse. O limiar foi ajustado manualmente até que os contornos do dente fossem adequadamente segmentados, permitindo o cálculo da área por meio do comando *Measure*.

Figura 4 – Exemplo de aplicação do efeito de limiarização da imagem da emenda finger joint para medição dos parâmetros geométricos.

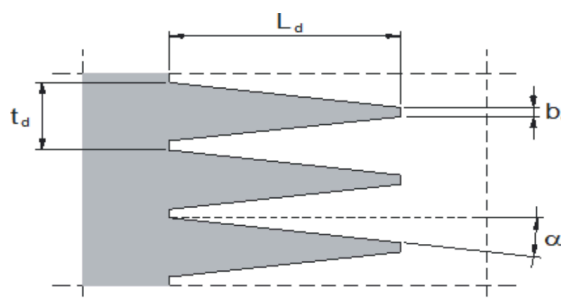


Fonte: Autor (2026).

4.5 PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO NORMATIVA.

A verificação normativa da geometria das emendas dentadas foi realizada com base nos parâmetros obtidos por meio da análise digital das imagens no software ImageJ. Para cada corpo de prova, considerou-se a média aritmética dos valores medidos nos três primeiros dentes íntegros da emenda, conforme metodologia previamente descrita. A Figura 4 apresenta a representação normativa dos principais parâmetros geométricos das emendas dentadas, conforme estabelecido pela ABNT NBR 7190-1:2022, a qual fundamenta as verificações geométricas realizadas neste trabalho.

Figura 4 – Representação normativa dos parâmetros geométricos das emendas dentadas.



Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Onde:

- Comprimento do dente (L_d): determinado como o comprimento projetado do dente no eixo longitudinal da peça, ou seja, a projeção corrigida da geometria inclinada;
- Espessura da extremidade do dente (b_d): medida perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça;
- Passo entre dentes (t_d): correspondente à distância entre pontos equivalentes consecutivos da emenda dentada;
- Ângulo de inclinação dos flancos (α_d): determinado em relação ao eixo longitudinal da peça.

Inicialmente, para cada amostra, foi calculado o valor limite admissível da espessura da ponta do dente, utilizando-se a expressão:

Equação 1 – Determinação do valor limite admissível da espessura da ponta do dente ($b_{d,lim}$).

$$b_{d,lim} = 0,05 \cdot L_d$$

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Em seguida, o valor medido de b_d foi comparado com o valor limite calculado. As emendas foram classificadas como conformes quando a condição $b_d \leq 0,05 \cdot L_d$ foi satisfeita e como não conformes quando essa relação foi excedida.

Posteriormente, os valores médios do ângulo de inclinação dos flancos foram comparados com o intervalo normativo estabelecido, verificando-se o atendimento à condição:

Equação 2 – Condição normativa para o ângulo de inclinação dos flancos do dente (α_d).

$$5^\circ \leq \alpha_d \leq 7^\circ$$

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Na sequência, aplicou-se a verificação da condição combinada, calculando-se para cada corpo de prova o valor da expressão:

Equação 3 – Condição combinada de verificação geométrica das emendas dentadas.

$$\frac{50 \cdot b_d}{L_d \cdot \tan(\alpha_d) + b_d}$$

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Os resultados obtidos foram comparados com o valor limite igual a 20, conforme prescrito na norma. Valores inferiores ou iguais a 20 foram considerados adequados sob o ponto de vista normativo.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS OBTIDOS

A análise estatística foi realizada com o objetivo de caracterizar a variabilidade geométrica das emendas finger joint e verificar possíveis relações entre os

parâmetros geométricos, bem como sua influência complementar no desempenho mecânico à flexão. Inicialmente, os dados foram submetidos à estatística descritiva, com determinação da média, desvio padrão e coeficiente de variação. Com o objetivo de avaliar a influência da geometria das emendas dentadas no desempenho mecânico, foi realizada uma análise estatística simples relacionando a área livre entre os dentes com a força de ruptura obtida nos ensaios mecânicos. Inicialmente, a normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro–Wilk. Considerando que as variáveis analisadas apresentaram distribuição normal teoricamente deveria-se utilizar o método de correlação de Pearson, porém devido ao baixo número de corpo de provas, optou-se pela utilização do coeficiente de correlação de Spearman, método não paramétrico adequado para avaliar a relação entre variáveis contínuas. O nível de significância adotado foi de 5%. As análises foram realizadas no software RStudio (versão 2023.06.1).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DAS EMENDAS FINGER JOINT

Os parâmetros geométricos médios obtidos a partir da análise digital das imagens no software ImageJ encontram-se apresentados na Tabela 4. Para cada corpo de prova, os valores de comprimento do dente (L_d), passo entre dentes (t_d), espessura da ponta do dente (b_d) e ângulo de inclinação dos flancos (α_d) foram determinados como a média aritmética das medições realizadas nos três primeiros dentes íntegros da emenda.

Tabela 4 - Parâmetros geométricos coletados das medições dos corpos de prova.

Descrição	Comprimento do dente - Ld (mm)	Passo entre dentes - Td (mm)	Espessura do dente - Bd (mm)	Ângulo do flanco α_d (°)	Área livre entre os dentes (mm ²)
CP1 SF	18,51 ± 0,28	5,72 ± 0,10	1,11 ± 0,16	6,71 ± 0,45	15,91
CP 2 SE	18,55 ± 0,13	5,65 ± 0,11	1,08 ± 0,18	7,59 ± 0,64	1,93
CP 2 SF	18,65 ± 0,19	5,80 ± 0,14	1,20 ± 0,26	6,51 ± 0,33	14,54
CP 3 SF	18,17 ± 0,24	5,52 ± 0,35	1,08 ± 0,07	6,35 ± 0,53	9,30
CP 5 SF	18,36 ± 0,08	5,70 ± 0,01	1,00 ± 0,07	6,32 ± 0,71	6,21
CP 6 SE	18,78 ± 0,03	5,83 ± 0,10	0,97 ± 0,06	5,78 ± 0,53	6,66
CP 7 SE	18,44 ± 0,14	5,72 ± 0,17	1,11 ± 0,07	6,69 ± 0,25	7,65
CP 7 SF	18,26 ± 0,18	5,61 ± 0,13	1,03 ± 0,21	7,14 ± 0,52	0,23
CP 8 SF	18,30 ± 0,14	5,61 ± 0,25	1,07 ± 0,08	7,27 ± 0,86	5,72
CP 9 SE	18,33 ± 0,13	5,66 ± 0,03	1,04 ± 0,17	6,62 ± 0,33	3,78
CP 9 SF	18,67 ± 0,10	5,67 ± 0,13	1,16 ± 0,09	6,48 ± 0,16	5,47
CP 10 SE	18,42 ± 0,24	5,70 ± 0,12	1,16 ± 0,18	6,87 ± 0,10	5,91
CP 1 C	19,18 ± 0,12	5,49 ± 0,12	1,03 ± 0,08	5,22 ± 0,24	3,83
CP 1 SA	18,32 ± 0,14	5,56 ± 0,14	0,94 ± 0,05	5,46 ± 0,35	3,17
CP 1 SD	18,40 ± 0,15	5,71 ± 0,31	1,12 ± 0,03	5,68 ± 0,94	3,64
CP 2 SA	19,14 ± 0,37	5,76 ± 0,11	1,08 ± 0,17	6,20 ± 0,23	6,69
CP 5 SB	17,99 ± 0,19	5,31 ± 0,20	0,96 ± 0,02	5,74 ± 0,79	1,46
CP 6 SA	18,20 ± 0,17	5,79 ± 0,13	0,91 ± 0,18	5,89 ± 0,41	6,13
CP 6 SB	18,47 ± 0,42	5,58 ± 0,10	1,12 ± 0,19	5,60 ± 1,07	10,20
CP 10 SA	19,32 ± 0,05	5,79 ± 0,26	1,07 ± 0,13	5,75 ± 0,37	7,04

Fonte: Autor (2026).

De modo geral, observou-se baixa variabilidade nos valores de comprimento do dente e do passo entre dentes, com desvios padrão reduzidos, indicando boa repetibilidade do processo de usinagem. Os valores médios de Ld situaram-se predominantemente no intervalo de aproximadamente 17,99 mm a 19,49 mm, enquanto o passo entre dentes variou em torno de 5,3 mm a 6,0 mm.

Por outro lado, a espessura da ponta do dente (bd) apresentou maior dispersão relativa, com valores médios frequentemente superiores a 1,0 mm e desvios padrão mais elevados em alguns corpos de prova. Esse comportamento sugere menor controle dimensional na extremidade dos dentes, região crítica do ponto de vista estrutural, uma vez que está diretamente associada à redução da seção resistente da peça.

Os valores médios do ângulo de inclinação dos flancos (α_d) variaram aproximadamente entre 4,7° e 7,6°, indicando a presença de corpos de prova tanto dentro quanto fora do intervalo normativo estabelecido, conforme discutido nas subseções seguintes.

5.1.1 Verificação normativa da espessura da ponta do dente

Os resultados da verificação normativa da espessura da ponta do dente, conforme a condição estabelecida na Equação 1 ($bd \leq 0,05 \cdot Ld$), estão apresentados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Verificação normativa da espessura da ponta do dente.

Descrição	Espessura do dente - Bd (mm)	Bd limite (mm)	VERIFICAÇÃO ($bd < 0,05 \cdot Ld$)
CP1 SF	1,11 ± 0,16	0,93	NÃO CONFORME
CP 2 SE	1,08 ± 0,18	0,93	NÃO CONFORME
CP 2 SF	1,20 ± 0,26	0,93	NÃO CONFORME
CP 3 SF	1,08 ± 0,07	0,91	NÃO CONFORME
CP 5 SF	1,00 ± 0,07	0,92	NÃO CONFORME
CP 6 SE	0,97 ± 0,06	0,94	NÃO CONFORME
CP 7 SE	1,11 ± 0,07	0,92	NÃO CONFORME
CP 7 SF	1,03 ± 0,21	0,91	NÃO CONFORME
CP 8 SF	1,07 ± 0,08	0,92	NÃO CONFORME
CP 9 SE	1,04 ± 0,17	0,92	NÃO CONFORME
CP 9 SF	1,16 ± 0,09	0,93	NÃO CONFORME
CP 10 SE	1,16 ± 0,18	0,92	NÃO CONFORME
CP 1 C	1,03 ± 0,08	0,96	NÃO CONFORME
CP 1 SA	0,94 ± 0,05	0,92	NÃO CONFORME
CP 1 SD	1,12 ± 0,03	0,92	NÃO CONFORME
CP 2 SA	1,08 ± 0,17	0,96	NÃO CONFORME
CP 5 SB	0,96 ± 0,02	0,90	NÃO CONFORME
CP 6 SA	0,91 ± 0,18	0,91	CONFORME
CP 6 SB	1,12 ± 0,19	0,92	NÃO CONFORME
CP 10 SA	1,07 ± 0,13	0,97	NÃO CONFORME

Fonte: Autor (2026).

Os resultados da verificação normativa da espessura da ponta do dente indicam que apenas 4,17% dos corpos de prova atenderam ao critério estabelecido, enquanto 95,83% foram classificados como não conformes. Esse elevado índice de não conformidade evidencia deficiência sistemática no controle da geometria da extremidade dos dentes durante o processo de fabricação.

5.1.2 Verificação normativa do ângulo de inclinação dos flancos

Conforme apresentado na Tabela 6, a verificação normativa do ângulo de inclinação dos flancos demonstrou boa conformidade na maioria dos corpos de prova analisados. Observou-se que 85% das amostras apresentaram valores de α_d dentro do intervalo admissível estabelecido, enquanto 15% foram classificados como não

conformes para esse parâmetro. Ângulos excessivamente elevados tendem a reduzir a área efetiva de colagem e a eficiência da transmissão de esforços ao longo da emenda, enquanto ângulos muito reduzidos podem aumentar a concentração de tensões na extremidade dos dentes (Forest Products Laboratory, 2010). Dessa forma, a variabilidade observada nesse parâmetro reforça a importância do controle geométrico rigoroso durante a fabricação das emendas.

Tabela 6 – Verificação normativa do Ângulo do flanco.

Descrição	Ângulo do flanco α_d (°)	VERIFICAÇÃO ($5^\circ < \alpha_d < 7^\circ$)
CP1 SF	$6,71 \pm 0,45$	CONFORME
CP 2 SE	$7,59 \pm 0,64$	NÃO CONFORME
CP 2 SF	$6,51 \pm 0,33$	CONFORME
CP 3 SF	$6,35 \pm 0,53$	CONFORME
CP 5 SF	$6,32 \pm 0,71$	CONFORME
CP 6 SE	$5,78 \pm 0,53$	CONFORME
CP 7 SE	$6,69 \pm 0,25$	CONFORME
CP 7 SF	$7,14 \pm 0,52$	NÃO CONFORME
CP 8 SF	$7,27 \pm 0,86$	NÃO CONFORME
CP 9 SE	$6,62 \pm 0,33$	CONFORME
CP 9 SF	$6,48 \pm 0,16$	CONFORME
CP 10 SE	$6,87 \pm 0,10$	CONFORME
CP 1 C	$5,22 \pm 0,24$	CONFORME
CP 1 SA	$5,46 \pm 0,35$	CONFORME
CP 1 SD	$5,68 \pm 0,94$	CONFORME
CP 2 SA	$6,20 \pm 0,23$	CONFORME
CP 5 SB	$5,74 \pm 0,79$	CONFORME
CP 6 SA	$5,89 \pm 0,41$	CONFORME
CP 6 SB	$5,60 \pm 1,07$	CONFORME
CP 10 SA	$5,75 \pm 0,37$	CONFORME

Fonte: Autor (2026).

5.1.3 Verificação normativa da condição combinada

A verificação da condição combinada apresentou maior rigor na avaliação geométrica das emendas finger joint, resultando em 100% dos corpos de prova classificados como conformes, conforme registrado na Tabela 7. A análise indica que todos os corpos de prova atenderam simultaneamente aos critérios normativos estabelecidos, permanecendo dentro do valor limite igual a 20.

Tabela 7 – Verificação normativa da condição combinada.

Descrição	$(50 * bd / Ld * tg(\alpha d) + bd)$	VERIFICAÇÃO $(50 * bd / Ld * tg(\alpha d) + bd) < 20$
CP1 SF	16,87	CONFORME
CP 2 SE	15,16	CONFORME
CP 2 SF	18,06	CONFORME
CP 3 SF	17,44	CONFORME
CP 5 SF	16,46	CONFORME
CP 6 SE	16,85	CONFORME
CP 7 SE	16,91	CONFORME
CP 7 SF	15,91	CONFORME
CP 8 SF	15,74	CONFORME
CP 9 SE	16,39	CONFORME
CP 9 SF	17,70	CONFORME
CP 10 SE	17,19	CONFORME
CP 1 C	18,54	CONFORME
CP 1 SA	17,43	CONFORME
CP 1 SD	18,99	CONFORME
CP 2 SA	17,09	CONFORME
CP 5 SB	17,35	CONFORME
CP 6 SA	16,29	CONFORME
CP 6 SB	19,09	CONFORME
CP 10 SA	17,74	CONFORME

Fonte: Autor (2026).

Observa-se que todos os corpos de prova atenderam aos critérios estabelecidos, evidenciando a adequação do processo de fabricação e o controle geométrico das emendas. Dessa forma, a conformidade integral dos corpos de prova sugere que não há indícios de comprometimento do desempenho mecânico associados aos parâmetros geométricos avaliados.

5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

A análise estatística descritiva dos parâmetros geométricos evidenciou baixa variabilidade para o comprimento do dente (Ld) e para o passo entre dentes (td), com coeficientes de variação inferiores a 3%, indicando bom controle dimensional desses parâmetros.

Por outro lado, a espessura do dente (bd) e o grau de enfraquecimento combinado apresentaram coeficientes de variação superiores a 9%, revelando maior dispersão dos dados, o que indica sensibilidade desses parâmetros às condições de usinagem e montagem das emendas finger joint.

Tabela 8 – Estatística descritiva dos parâmetros geométricos

Variável	Média	Desvio Padrão	CV(%)	Mínimo	Máximo
Comprimento do dente – Ld (mm)	18,61	0,44	2,36	17,99	19,49
Passo entre dentes – td (mm)	5,68	0,15	2,57	5,31	5,96
Espessura do dente – bd (mm)	1,08	0,10	9,08	0,91	1,30
Grau de enfraquecimento combinado (%)	17,77	1,73	9,75	15,16	21,78

Fonte: Autor (2026).

5.2.1 Teste de normalidade (shapiro–wilk)

O teste de Shapiro–Wilk indicou que o comprimento do dente (Ld) e o grau de enfraquecimento não apresentam distribuição normal ($p < 0,05$), enquanto o passo entre dentes (td), a espessura do dente (bd), a Tensão de Ruptura e a área livre entre os dentes apresentaram distribuição aproximadamente normal ($p > 0,05$).

Tabela 9 – Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)

Variável	Estatística W	p-valor	Distribuição
Comprimento do dente – Ld (mm)	0.88786	0.01201	Não Normal
Passo entre dentes – td (mm)	0.9757	0.8054	Normal
Espessura do dente – bd (mm)	0,98093	0,9123	Normal
Tensão de ruptura (MPa)	0.96410	0.6286	Normal
Área livre entre os dentes (mm ²)	0.92029	0.1003	Normal
Grau de enfraquecimento combinado (%)	0.91538	0.04621	Não Normal

Fonte: Autor (2026).

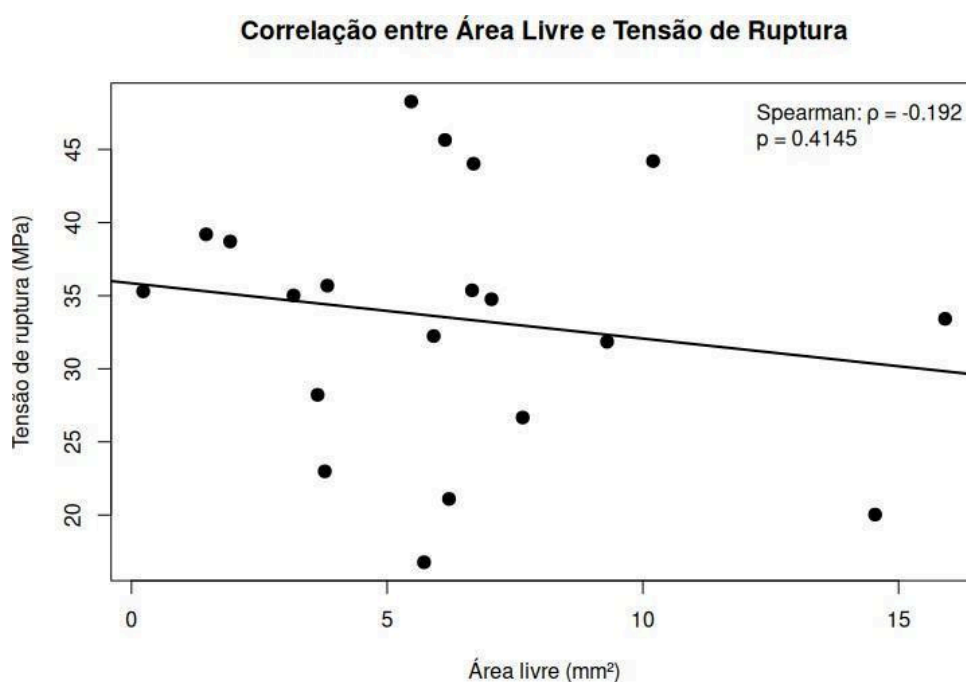
A não normalidade observada para o comprimento do dente sugere a presença de assimetrias no processo de usinagem, possivelmente associadas a ajustes operacionais ou variações do material. O parâmetro da equação de verificação combinada também foi classificado como não normalmente distribuído, resultado incoerente com a presença de valores conformes identificados na verificação normativa.

Diante desse comportamento, adotou-se abordagem estatística conservadora, priorizando métodos não paramétricos para a análise de correlação entre as variáveis geométricas.

5.2.2 Análise estatística da área livre x tensão de ruptura

A análise gráfica dos resultados permite uma avaliação integrada do comportamento mecânico das emendas dentadas. Conforme apresentado na Figura 5, que ilustra a relação entre a área livre entre os dentes e a resistência à flexão, observa-se elevada dispersão dos pontos e ausência de tendência linear claramente definida.

Figura 5 - Gráfico de dispersão (Área livre × Tensão de ruptura).

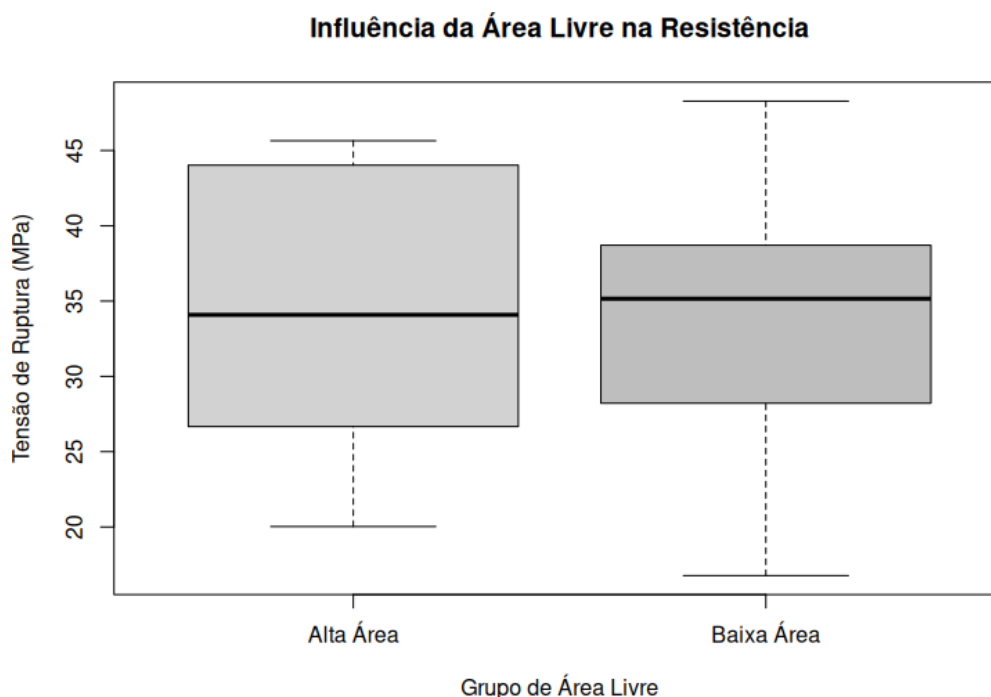


Fonte: Autor (2026).

A análise de correlação de Spearman indicou coeficiente $\rho = -0,192$, com $p = 0,4145$, evidenciando uma correlação fraca e negativa entre a área livre e a tensão de ruptura. No entanto, a relação não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$), indicando ausência de evidências de associação entre as variáveis analisadas.

A Figura 6 apresenta o boxplot da tensão de ruptura em função dos grupos de área livre (Alta Área e Baixa Área), permitindo a comparação da distribuição dos dados entre os dois grupos.

Figura 6 - Gráfico Boxplot – Influência da área livre.

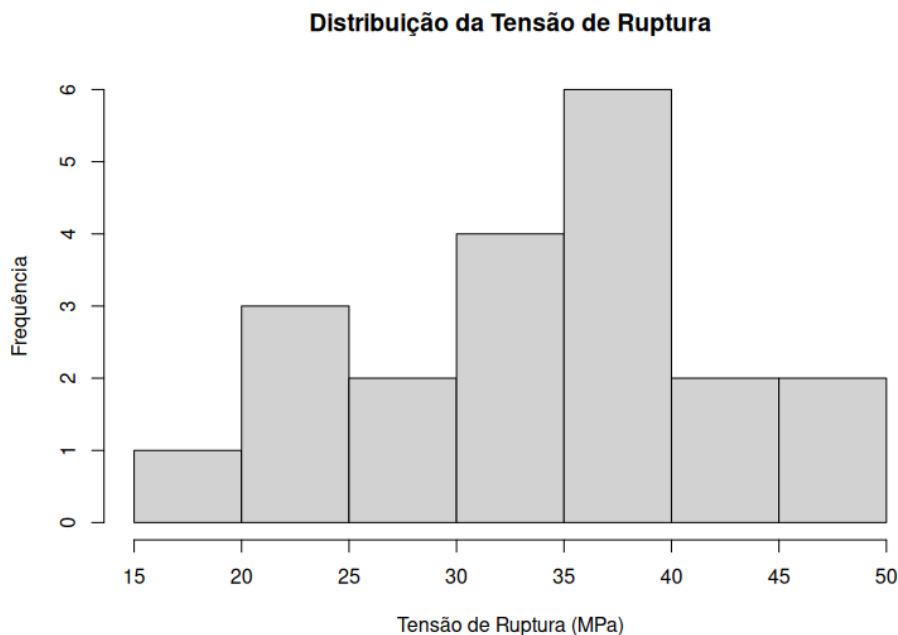


Fonte: Autor (2026).

Verifica-se ampla sobreposição dos intervalos dos quartis e proximidade entre as medianas, indicando que não houve diferença expressiva de resistência entre os grupos. A dispersão observada evidencia a variabilidade natural do material e possíveis influências de outros fatores associados ao processo de fabricação e à qualidade da colagem, por exemplo.

Por sua vez, a Figura 7 apresenta o histograma da resistência à ruptura, evidenciando distribuição aproximadamente simétrica, compatível com o teste de normalidade previamente realizado. Observa-se concentração predominante dos valores na faixa intermediária de resistência, com poucos resultados extremos, sugerindo comportamento estrutural relativamente homogêneo no conjunto de corpos de prova avaliados.

Figura 7 - Histograma da resistência.



Fonte: Autor (2026).

De forma conjunta, as análises gráficas indicam que, embora teoricamente o aumento da área livre entre os dentes possa reduzir a área efetiva de colagem, os resultados experimentais não demonstraram tendência consistente de diminuição da resistência associada a esse parâmetro geométrico, sugerindo a atuação concomitante de outros fatores no desempenho das emendas.

5.3 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO COM MADEIRA MACIÇA

Os valores médios de tensão de ruptura obtidos para os corpos de prova com emenda dentada foram comparados aos resultados provenientes de ensaios de flexão realizados em corpos de prova de madeira maciça da mesma espécie, sem emenda.

A Tabela 3 apresentou os valores individuais de tensão de ruptura obtidos nos ensaios de flexão estática dos corpos de prova com emenda dentada. Considerando-se todas as amostras válidas, obteve-se tensão média de ruptura igual a 34,52 MPa, com desvio padrão de 7,63 MPa e coeficiente de variação de 22,1%, indicando dispersão significativa dos resultados, conforme tabela 10 a seguir:

Tabela 10 - Valores médios dos resultados do ensaio de flexão estática

Descrição	Tensão de ruptura média(MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
Sem emenda	45,77	17,61	38,47
Com emenda	33,48	8,75	26,14

Fonte: Autor (2026).

Para efeito comparativo, foram considerados os resultados de ensaios de flexão realizados em corpos de prova de madeira maciça de *Pinus sp.*, sem a presença de emenda, cuja tensão média de ruptura foi de 45,77 MPa.

A eficiência estrutural da ligação foi determinada pela razão entre a resistência média das peças emendadas e a resistência média da madeira maciça.

O resultado indica que as emendas dentadas mantiveram aproximadamente 73,2% da resistência da madeira maciça.

5.3.1 Discussão dos resultados comparativos

O valor de eficiência obtido situa-se no limite inferior da faixa usualmente considerada aceitável para aplicações estruturais, uma vez que emendas dentadas adequadamente executadas devem atingir valores superiores a 80% da resistência da madeira íntegra.

A redução observada pode ser atribuída a diferentes fatores identificados ao longo da análise experimental. Primeiramente, verificou-se elevada taxa de não conformidade quanto à espessura da ponta dos dentes, com 95,83% das amostras apresentando valores superiores ao limite normativo. Essa condição implica aumento do grau de enfraquecimento da seção resistente e possível concentração de tensões na região da junta. Além disso, a análise estatística evidenciou correlação negativa entre a área livre entre os dentes e a força de ruptura, indicando que maiores áreas não coladas estão associadas à redução da capacidade resistente da ligação. Tal comportamento reforça a importância da adequada compressão durante o processo de prensagem.

5.4 ANÁLISE DOS MODOS DE RUPTURA

Durante a avaliação pós-ensaio, realizou-se a análise visual das superfícies de ruptura dos corpos de prova, com o objetivo de identificar o modo de falha e sua relação com os parâmetros geométricos e com a qualidade do material.

Observou-se predominância de rupturas localizadas na região da emenda dentada (Figura 8), especialmente na interface madeira–adesivo e na zona adjacente à ponta dos dentes. Em diversas amostras, a falha ocorreu na madeira próxima à linha de cola, caracterizando ruptura parcialmente na madeira e parcialmente na interface adesiva.

Figura 8 - Ruptura na emenda do corpo de prova.



Fonte: Autor (2026).

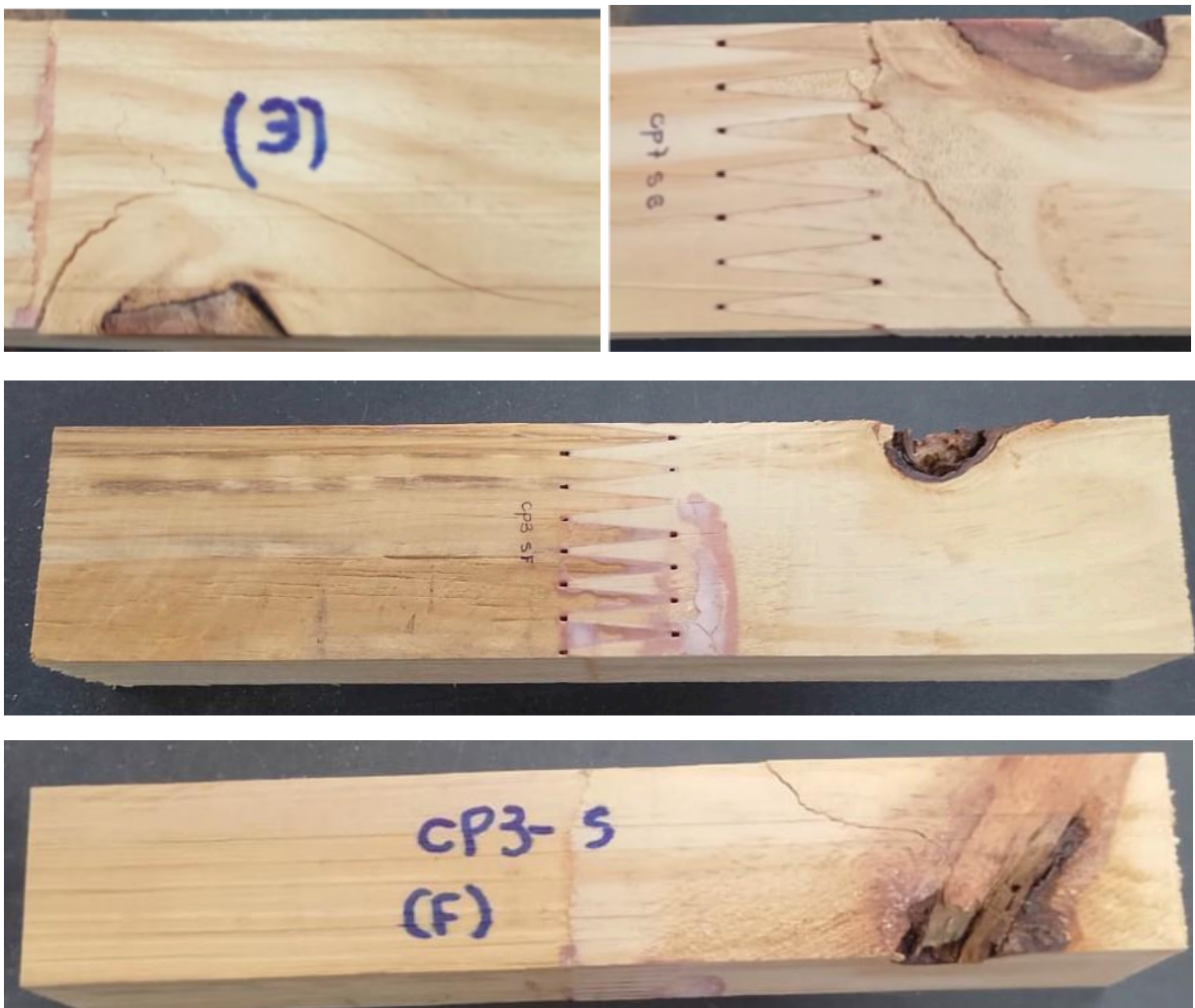
Adicionalmente, verificou-se, em determinados corpos de prova, a presença de nós situados próximos à região da emenda (Figura 9 e 10). Nessas amostras, a ruptura ocorreu preferencialmente na proximidade desses defeitos naturais, indicando concentração de tensões associada à descontinuidade anatômica.

Figura 9 - Presença de defeitos nos corpos de prova.



Fonte: Autor (2026).

Figura 10 - Defeitos naturais observados na região da emenda.



Fonte: Autor (2026).

A presença de nós em regiões adjacentes à junta é estruturalmente relevante, uma vez que esses defeitos causam desvio das fibras e aumento da heterogeneidade local promovendo a redução da seção resistente efetiva. Assim, ainda que os parâmetros geométricos da emenda atendam parcialmente aos critérios normativos, a existência de defeitos naturais pode atuar como fator limitante do desempenho mecânico.

Os resultados sugerem, portanto, que o modo de ruptura não esteve associado exclusivamente à geometria dos dentes, mas também à qualidade intrínseca da madeira empregada.

5.5 VARIABILIDADE ANATÔMICA DA MADEIRA

Durante a inspeção dos corpos de prova, observou-se variação significativa na largura e na proporção dos anéis de crescimento entre as amostras, conforme ilustrado na Figura 11, na qual três corpos de prova são apresentados lado a lado, evidenciando visualmente essa heterogeneidade anatômica. Nota-se que algumas peças apresentam anéis de crescimento mais largos, característicos de maior proporção de lenho inicial, enquanto outras demonstram maior concentração de lenho tardio, perceptível pela maior proporção de lenho tardio e coloração mais escura.

Essa variação anatômica evidencia a heterogeneidade natural da madeira utilizada nos corpos de prova. Diferenças na largura dos anéis de crescimento e na proporção entre lenho inicial e lenho tardio podem influenciar as propriedades físicas e mecânicas do material, contribuindo para a dispersão dos resultados observados nos ensaios de flexão.

Figura 11 - Variação visual dos anéis de crescimento nos corpos de prova



Fonte: Autor (2026).

Além disso, tendo em vista que a técnica de emenda finger joint tem como princípio a eliminação de defeitos estruturais e a seleção de regiões mais homogêneas da madeira, a presença de nós e a heterogeneidade anatômica da madeira sugerem possível ausência de classificação visual ou controle mais rigoroso da matéria-prima antes das etapas de usinagem e colagem.

6 CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados e das análises estatísticas aplicadas, foi possível avaliar o comportamento mecânico das emendas dentadas e investigar a possível influência da área livre entre os dentes na resistência à ruptura das peças.

Os resultados obtidos indicaram que não houve correlação estatisticamente significativa entre a área livre medida e a resistência mecânica das emendas. Dessa forma, nas condições analisadas neste estudo, não foi possível confirmar que a variação da área livre influencie diretamente o desempenho mecânico das emendas finger joint.

Entretanto, a ausência de significância estatística não implica necessariamente na inexistência de efeito. Considerando a variabilidade natural da madeira, a dispersão dos resultados e o número de amostras avaliadas, não se pode descartar a ocorrência de erro tipo II, caracterizado pela não detecção de uma relação eventualmente existente. Essa limitação é inerente a estudos experimentais com materiais naturais e deve ser considerada na interpretação dos resultados.

Durante a análise dos corpos de prova, foi observada a presença de defeitos naturais da madeira, especialmente nós, em algumas amostras. Parte das rupturas ocorreu nas proximidades desses defeitos, evidenciando concentração de tensões e influência direta dessas discontinuidades no comportamento mecânico. Em elementos estruturais com emendas finger joint, a presença de defeitos significativos na região da junta não é recomendada, pois compromete a uniformidade na distribuição de esforços e pode reduzir a resistência do conjunto.

Além disso, a variabilidade natural da madeira deve ser considerada como fator relevante na análise dos resultados. A literatura estabelece relação direta entre densidade e resistência mecânica, sendo a densidade um dos principais parâmetros indicativos das propriedades estruturais da madeira, apresentando correlação positiva com o desempenho mecânico. Assim, variações de densidade, associadas à presença de defeitos, podem ter contribuído para a dispersão dos resultados observados.

Destaca-se que a presença de área livre entre os dentes não é desejável, uma vez que a emenda deve apresentar contato efetivo entre as superfícies coladas, garantindo adequada transferência de esforços. Dessa forma, recomenda-se que o processo de colagem seja realizado sob pressões compatíveis com a densidade da

madeira (vide Tabela 1) , assegurando o fechamento completo dos dentes e a eficiência da ligação.

Sob a perspectiva industrial, os resultados reforçam a necessidade de controle rigoroso dos parâmetros produtivos, incluindo a seleção adequada da matéria-prima, a eliminação de defeitos na região da emenda, o controle do processo de usinagem e a aplicação de pressão adequada durante a prensagem. O desempenho estrutural das emendas finger joint depende da interação desses fatores, não podendo ser explicado por uma única variável isolada.

Por fim, verificou-se que a redução de aproximadamente 24,6% da resistência em relação à madeira maciça não pode ser atribuída a um único fator, mas sim à interação entre variabilidade da matéria-prima, presença de defeitos naturais e possíveis limitações no processo de colagem e prensagem. Assim, conclui-se que o desempenho estrutural das emendas não depende exclusivamente dos parâmetros geométricos estabelecidos em norma, mas da interação entre geometria, qualidade da madeira e controle industrial do processo produtivo.

Dessa forma, considera-se que os objetivos propostos foram atingidos, uma vez que foi realizada a caracterização geométrica das emendas, analisados os ensaios mecânicos e aplicado tratamento estatístico adequado aos dados obtidos.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5572**: standard specification for adhesives used for finger joints in lumber. West Conshohocken: ASTM International, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D905**: standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. West Conshohocken: ASTM International, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-1:2022**: projeto de estruturas de madeira – Parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 81 p.
- AUTY, D.; ACHIM, A. The influence of forest management on wood quality: a review. **Forests**, Basel, v. 14, n. 3, p. 1–18, 2023.
- BARRETTE, J.; ACHIM, A.; AUTY, D. Impact of intensive forest management practices on wood quality from conifers: literature review and reflection on future challenges. **Current Forestry Reports**, [s. l.], v. 9, p. 101–130, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00181-6>. Acesso em: 01/06/2026
- CALIL JUNIOR, C.; DIAS, A. A. **Estruturas de madeira**: fundamentos e dimensionamento. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.
- CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.
- FLETCHER, B. **A history of architecture on the comparative method**. 20. ed. London: Architectural Press, 1996.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Forests and climate change**. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 01 jan. 2025.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2010. (General Technical Report FPL-GTR-190).
- FRIHART, Charles R. Adhesive bonding and performance testing of bonded wood products. In: ROSS, Robert J. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: Forest Products Laboratory, 2009. p. 10.1–10.24.
- FRIHART, Charles R. Wood adhesion and adhesives. In: ROWELL, Roger M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 255–318.
- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968.

NOGUEIRA, M. C. J.; LAHR, F. A. R. **Avaliação do desempenho mecânico de emendas dentadas em madeira estrutural**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

PFEIL, W. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PIZZI, Antonio; MITTAL, Kashmiri L. **Handbook of adhesive technology**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

RAPP, A. O.; MILITZ, H. Finger jointing of wood products. In: BURGER, N. (ed.). **Wood processing and utilization**. Munich: Holzforschung München, 2004.

SOUZA, A. J. D. *et al.* **Aproveitamento de resíduos madeireiros na produção de elementos estruturais colados**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2019.

ZHANG, S. *et al.* A review of the effect of fertilization on the wood properties of Pinus trees. **Forests**, Basel, v. 15, n. 2, p. 1–22, 2024.