

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO EM JUNTAS COLADAS DE MADEIRA ESTRUTURAL

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-431>

Data de submissão: 26/11/2024

Data de publicação: 26/12/2024

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: mantilla@dees.ufmg.br

Vinnicius Dordenoni Pizzol

Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor do Centro Universitário de Belo Horizonte - UNIB, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: Vinnicius.pizzol@prof.unibh.br

Mônica Azevedo Smits

Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor da Universidade de Itaúna - UIT, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: monicasmits@hotmail.com

Rejane Costa Alves

Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor da Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Alegre, ES, Brasil
E-mail: Rejane.alves@ufes.br

Ana Lúcia Crespo Oliveira

Doutora em Engenharia de Estruturas, Pós-doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: lucia@dees.ufmg.br

Fernando Murilo Gontijo Ramos

Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: fmgramos@arq.ufmg.br

Judy Norka Rodo Mantilla

Doutor em Engenharia Geotécnica, Professor Aposentado da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: judynorka@gmail.com

RESUMO

Este estudo investiga o comportamento de juntas coladas em madeira estrutural, com foco na análise das tensões normais e de cisalhamento ocorridas na linha adesiva. Foram utilizados corpos de prova de *Eucalyptus grandis* colados com adesivo resinoso de resorcinol. A pesquisa teve como objetivo comparar a resistência ao cisalhamento entre o ensaio de Push-out e o ensaio de cisalhamento direto, bem como avaliar a influência de tensões normais, especialmente a tensão perpendicular às fibras, na

ruptura de juntas coladas. Os resultados revelaram diferenças significativas na resistência ao cisalhamento entre os métodos de ensaio, destacando a importância das tensões normais, que se mostraram críticas para a falha estrutural. A distribuição de tensões ao longo da linha adesiva mostrou-se não uniforme, com concentrações nas extremidades na fase elástica e maior uniformidade na fase plástica. Esses achados contribuem para a compreensão do comportamento das juntas de madeira colada e sugerem a necessidade de análises detalhadas para otimizar o desempenho estrutural em aplicações práticas.

Palavras-chave: Tensões Normais. Tensões de Cisalhamento. Juntas Coladas. Madeira Estrutural. Eucalyptus Grandis. Resina de Resorcinol. Push-Out Test.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos e versáteis usados pelos seres humanos [1, 2]. Desde as primeiras construções rudimentares até as modernas estruturas de grande escala, a madeira tem sido valorizada por suas propriedades mecânicas, abundância e facilidade de manuseio [3]. No entanto, a verdadeira revolução no uso da madeira em estruturas de grande escala começou no século 19 com o advento das técnicas de colagem, que permitiram a criação de elementos estruturais maiores e mais robustos a partir de peças menores [4].

O desenvolvimento das técnicas de colagem de madeira começou com o uso de adesivos naturais, como colas animais e vegetais, que eram comuns até o final do século 19. Esses adesivos, no entanto, tinham limitações significativas, como baixa resistência ao cisalhamento e baixa durabilidade em ambientes úmidos ou sujeitos a variações extremas de temperatura [5]. A Revolução Industrial trouxe consigo a necessidade de materiais de construção mais robustos e duráveis, o que impulsionou a pesquisa e o desenvolvimento de adesivos sintéticos [6].

No início do século 20, a criação da resina de fenol-formaldeído marcou um ponto de virada na engenharia de madeira. Introduzida por Leo Baekeland em 1907, esta resina foi o primeiro plástico sintético comercializado e rapidamente encontrou aplicação na colagem de madeira. A resina de fenol-formaldeído conferiu juntas com alta resistência ao cisalhamento e excelente durabilidade, características essenciais para a construção de estruturas de madeira mais complexas e robustas [7].

Com o avanço das técnicas de colagem, surgiram produtos inovadores, como a madeira laminada colada (glulam) e a madeira laminada cruzada (CLT), que ampliaram as possibilidades de uso da madeira na construção civil [8]. A madeira laminada colada, por exemplo, foi inicialmente desenvolvida na Alemanha no final do século 19, mas sua aplicação em larga escala começou nas décadas de 1920 e 1930, especialmente em pontes e edifícios. Esses materiais permitem a construção de grandes estruturas com alta resistência mecânica, durabilidade e uma estética atraente, características cada vez mais valorizadas na construção sustentável [9, 10].

Paralelamente ao desenvolvimento de adesivos sintéticos e materiais colados, houve avanços significativos na resistência dos materiais, que forneceram as bases teóricas para a análise de tensões em juntas de madeira coladas. A teoria clássica da resistência dos materiais, formulada por cientistas como Augustin-Louis Cauchy no século 19, é importante para a compreensão das tensões internas em materiais sólidos, incluindo madeira [11]. Essa teoria permitia prever como os materiais se comportariam sob diferentes condições de carga, mas tinha limitações ao lidar com materiais anisotrópicos, como a madeira. A madeira, devido à sua natureza fibrosa, possui propriedades

mecânicas que variam significativamente em diferentes direções, o que dificulta a análise de tensões em juntas coladas [12].

Foi apenas na segunda metade do século 20 que a teoria da fratura mecânica linear começou a ser sistematicamente aplicada na análise de estruturas de madeira colada [13]. Inicialmente desenvolvida para materiais metálicos, essa teoria permitiu uma compreensão mais detalhada dos mecanismos de falha em estruturas coladas. A aplicação desta teoria à madeira foi pioneira no trabalho de Leicester na década de 1970, que demonstrou que as tensões de cisalhamento não são distribuídas linearmente ao longo da linha adesiva, especialmente na fase elástica [14, 15].

Essas descobertas foram fundamentais para a engenharia moderna de madeira, pois ajudaram a estabelecer diretrizes para o projeto de juntas coladas que consideram a distribuição não uniforme das tensões. Estudos experimentais mostraram que a resistência final de uma junta colada é fortemente influenciada por concentrações de tensão nas extremidades da linha adesiva, um fator que pode levar a falhas prematuras se não for considerado adequadamente no projeto [16, 17].

As juntas coladas desempenham um papel essencial na integridade estrutural dos elementos de madeira, especialmente em aplicações que exigem alta resistência e durabilidade. Com a crescente demanda por construções mais sustentáveis e a busca por materiais renováveis, a madeira tem se destacado como uma solução viável para construções de grande porte [1, 9]. No entanto, a complexidade das interações entre madeira e adesivo requer uma compreensão detalhada das tensões geradas em juntas coladas [18, 19].

Estudos recentes exploraram várias abordagens para melhorar a resistência dessas juntas, incluindo o uso de novos tipos de adesivos, tratamentos químicos de madeira e técnicas avançadas de fabricação, como impressão 3D de componentes de madeira colada [20]. A análise de tensões normais e de cisalhamento em juntas coladas tornou-se, assim, um campo de estudo essencial para garantir a segurança e durabilidade das estruturas de madeira [18].

Este estudo tem como objetivo contribuir para a compreensão do comportamento de juntas coladas em madeira, investigando a influência das tensões normais e de cisalhamento na linha adesiva. A escolha do *Eucalyptus grandis* [*Eucalyptus grandis*] e do adesivo à base de resina de resorcinol foi baseada em suas propriedades mecânicas, que são amplamente reconhecidas na indústria da construção [21]. A campanha experimental foi cuidadosamente planejada para simular condições reais de uso, usando corpos de prova representativos e medindo deformações ao longo da linha adesiva com extensômetros elétricos de alta precisão. Vários autores foram consultados para definir esta campanha experimental [22-25].

Os objetivos deste estudo incluem verificar experimentalmente que a resistência ao cisalhamento de uma junta colada, quando determinada através do ensaio Push-out, é diferente do ensaio de cisalhamento direto na linha adesiva; comprovando que a falha ocorre devido a tensões normais (tensão perpendicular às fibras); e avaliar como esses extremos são distribuídos ao longo da linha adesiva. Além disso, os resultados serão comparados com as teorias existentes para validar ou refutar os modelos teóricos atualmente utilizados na engenharia de madeira. Os resultados contribuirão para o aprimoramento das práticas de engenharia madeireira, oferecendo insights para o desenvolvimento de normas técnicas mais rigorosas capazes de garantir a segurança e durabilidade de estruturas construídas com madeira colada.

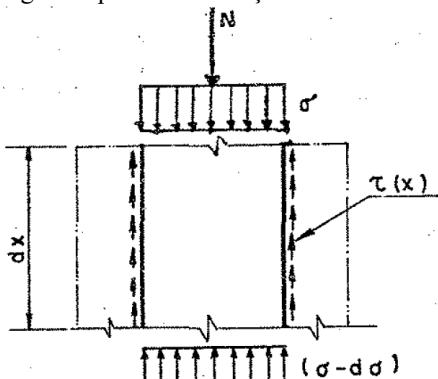
2 ANÁLISE TEÓRICA

As juntas coladas desempenham um papel decisivo na integridade estrutural dos elementos de madeira, especialmente em aplicações que exigem alta resistência e durabilidade. Para entender o comportamento dessas juntas sob diferentes condições de carregamento, é essencial analisar as tensões geradas na linha adesiva, considerando tanto as tensões normais quanto as de cisalhamento. Esta análise teórica é baseada nos fundamentos da resistência dos materiais e na teoria da fratura mecânica linear, fornecendo uma compreensão aprofundada dos mecanismos de falha em estruturas coladas.

2.1 TEORIA CLÁSSICA DA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

A teoria clássica da resistência dos materiais fornece a base para a análise de tensões em materiais sólidos, incluindo madeira. Em uma junta colada, a transmissão de carga ocorre predominantemente por meio de tensões de cisalhamento na linha adesiva, conforme ilustrado na Fig. 1. A distribuição dessas tensões ao longo da linha adesiva pode ser complexa, especialmente em estruturas com geometrias não lineares ou sujeitas a cargas variáveis [11].

Fig. 1. Equilíbrio de força no elemento dx .



Para uma junta colada sob compressão, a tensão máxima de cisalhamento na linha adesiva (τ_{ac}) pode ser expressa em função da força de solicitação normal (N) e do comprimento da linha adesiva (L_c), conforme a Eq. (1).

$$\tau = \frac{N}{2.a.L_c} = \frac{N}{2.A_c} \quad (1)$$

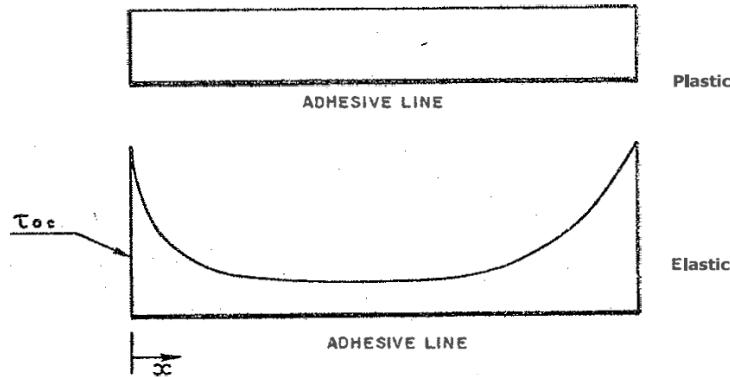
onde $A_c = a \cdot L_c$ é a área colada, sendo a a largura da linha adesiva.

[14] demonstraram que a tensão de cisalhamento τ_{ac} varia ao longo do comprimento da linha adesiva. Na fase elástica, a distribuição é não linear, com concentrações de tensão nas extremidades da linha adesiva, Fig. 2. Na fase plástica, a distribuição torna-se mais uniforme, conforme a Eq. (2).

$$\tau_{ac} = \frac{\tau_{pl}L_c}{2} \quad (2)$$

onde τ_{pl} representa a tensão de cisalhamento na fase plástica. A distribuição uniforme na fase plástica é crucial para prever o comportamento de ruptura em juntas coladas, pois a resistência final é alcançada quando a tensão de cisalhamento solicitante atinge o valor da tensão de escoamento do adesivo ou da interface madeira-adesivo.

Fig. 2. Distribuição de tensão de cisalhamento na linha adesiva.



Além das tensões de cisalhamento, as tensões normais também desempenham um papel significativo na resistência das juntas coladas. Essas tensões surgem devido à excentricidade da carga de solicitação e podem ser de tração (σ_{tn}) ou compressão (σ_{cn}) perpendiculares à linha adesiva. A Fig. 3 apresenta a distribuição dessas tensões, que são derivadas do momento fletor (M) e do par (F) aplicado ao longo da linha adesiva, descrito pela Eq. (3):

$$\sigma_{xn} = \frac{2.F}{y'.a} = \frac{2.M}{y'.a.z} = \frac{N.c}{y'.a.z}$$

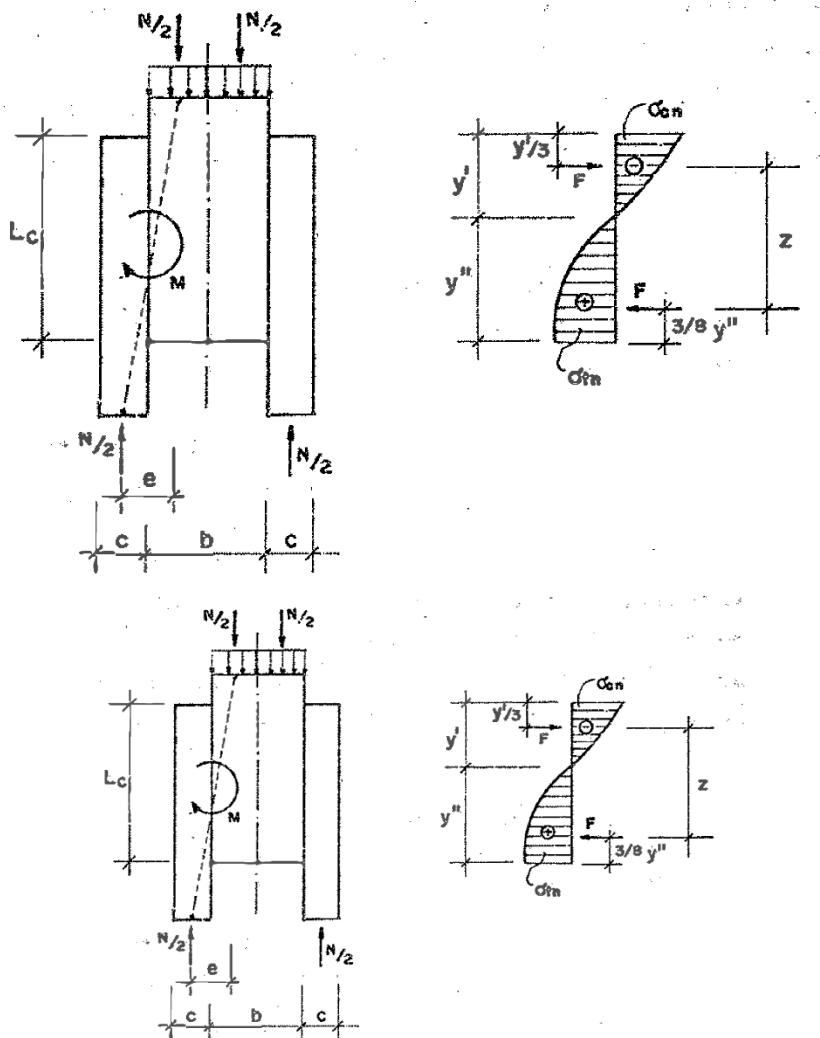
(3)

$$\sigma_{tn} = \frac{3.F}{2.y''.a} = \frac{3.M}{2.y''.a.z} = \frac{3.N.c}{4.y''.a.z}$$

Onde z é o braço de alavanca do par F , y' é a distância da face superior da peça até a linha neutra, y'' é a distância da face inferior da peça até a linha neutra, σ_{cn} é a tensão de compressão normal até a linha adesiva e σ_{tn} é a tensão de tração normal até a linha adesiva.

Essas equações demonstram que a distribuição de tensões normais ao longo da linha adesiva pode ser significativamente influenciada pela geometria da junta e pela posição da carga aplicada. A falha da junta ocorrerá quando a tensão de tração ou compressão solicitada exceder a resistência ao cisalhamento da madeira ou adesivo.

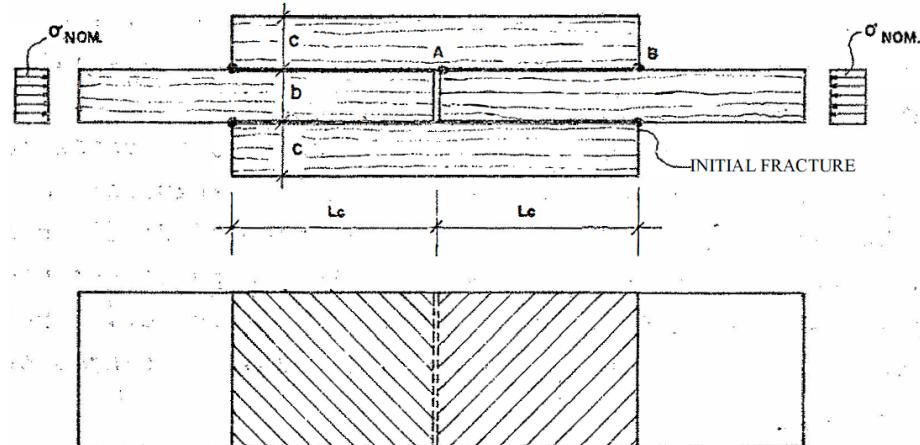
Fig. 3. Equilíbrio estático de forças e distribuição de tensões.



2.2 TEORIA DA FRATURA MECÂNICA LINEAR

A teoria da fratura mecânica linear é uma ferramenta essencial para prever o comportamento de falha em materiais como madeira colada. Essa teoria, aplicada a juntas coladas, considera a presença de trincas ou defeitos iniciais na linha adesiva, que podem servir como pontos de concentração de tensões. A falha ocorre quando a tensão máxima na junta atinge um valor crítico, levando ao colapso estrutural, conforme mostrado na Fig. 4.

Fig. 4. Junta típica sob carga compressiva.



A aplicação desta teoria à madeira estrutural foi apresentada por [14] e complementada por várias outras [15, 19]. Sucintamente, esta teoria está preocupada com a tensão máxima que aparece na junta típica, através da análise elástica de um corpo de prova. A tensão máxima pertence ao domínio do campo de tensão limitado pelas condições de contorno. De acordo com [16], geralmente, nas proximidades das juntas, existem dois tipos de campos de tensão máxima. A proporção desses campos é definida pelos fatores de intensidade de tensão (K_A e K_B), que consideram a geometria da junta e as condições de carregamento.

A tensão σ , em uma região próxima à articulação típica, pode ser representada pela Eq. (4)

$$\sigma = K_A \cdot (2 \cdot \pi \cdot r)^{-0.4502} \cdot f_A(\theta) + K_B \cdot (2 \cdot \pi \cdot r)^{-0.1028} \cdot f_B(\theta) \quad (4)$$

onde r e θ são as coordenadas polares referentes à articulação típica. Os termos $f_A(\theta)$ e $f_B(\theta)$ são funções exclusivamente de θ . Apenas os fatores de intensidade de tensão (K_A e K_B) influenciam a carga e dependem da estrutura.

A junta pode ser visualizada como se estivesse rodeada por um contorno em que a tensão estará de acordo com equações semelhantes à Eq. (4), tendo o mesmo formato de distribuição de tensões para todas as juntas semelhantes em elementos estruturais. Assim, a resistência do material dentro desse contorno pode ser expressa em função de KA e KB. Desta forma, o colapso crítico ocorrerá quando a Eq. (5) for alcançado.

$$f \left(\frac{K_A}{K_{AC}} \cdot \frac{K_B}{K_{BC}} \right) = 1 \quad (5)$$

onde KAC e KBC são as características das propriedades de resistência do material, análogas ao módulo de ruptura ou resistência ao cisalhamento em um corpo de prova. KAC é o valor de ruptura de KA quando KB é zero e KBC é definido de forma análoga.

Os valores de KA e KB são obtidos a partir de uma análise bidimensional de tensão elástica, usando a técnica de elementos finitos [16, 26]. Esses valores, válidos para a junta mostrada na Fig. 4, são adimensionais. Os valores de KB são menores que os valores de KA e, à medida que r diminui, a tensão associada a KA, Eq. (4), aumenta mais rapidamente em relação a KB. Consequentemente, o colapso crítico para juntas adesivas, de acordo com a teoria da fratura mecânica linear, pode ser razoavelmente aproximado pela Eq. (6).

$$K_A = K_B \quad (6)$$

Ou seja, considerando a plastificação completa do material, o colapso crítico tomará a forma da equação 1, que foi obtida na análise a partir da resistência dos materiais, confirmando a validade de sua aplicação.

A validade dessas formulações teóricas foi extensivamente testada em estudos experimentais que usaram corpos de prova de madeira colada para verificar a precisão das previsões teóricas. Os resultados desses estudos demonstraram uma forte correlação entre as tensões previstas e observadas experimentalmente, fornecendo uma base sólida para a aplicação dessas teorias na prática [16, 18, 21].

A teoria da análise de elementos finitos, que oferece uma análise tridimensional detalhada da distribuição de tensões, não foi aplicada diretamente neste estudo, embora seja uma ferramenta poderosa em análises mais complexas. Da mesma forma, outros conceitos avançados de simulação

computacional, como análise progressiva de trincas e modelagem não linear de falha adesiva, foram mencionados apenas como possíveis áreas para pesquisas futuras.

É importante notar que, embora esses modelos teóricos forneçam informações valiosas sobre o comportamento das juntas de madeira coladas, eles são baseados em certas simplificações e suposições. Na prática, fatores como anisotropia da madeira, variações nas propriedades adesivas e condições ambientais podem influenciar o comportamento das juntas de maneiras que podem não ser totalmente capturadas por esses modelos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A campanha experimental foi projetada com o objetivo de avaliar de forma sistemática e controlada a distribuição das tensões normais e de cisalhamento na linha adesiva de juntas de madeira coladas, utilizando corpos de prova especialmente fabricados para simular condições reais de uso em estruturas de madeira. As seções a seguir detalham os materiais, a metodologia para montar as amostras de teste, os procedimentos de teste e a instrumentação empregada.

Os ensaios foram realizados nas instalações do Centro de Pesquisas Avançadas em Madeira e Novos Materiais (CPAM3) e do Laboratório de Análises Experimentais de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

3.1 MATERIAIS

A madeira utilizada para a fabricação dos corpos de prova foi o *Eucalyptus grandis*, espécie nativa da América do Sul, conhecida por suas excelentes propriedades mecânicas e durabilidade. *Eucalyptus grandis* tem uma densidade aparente que varia entre 6,1 kN/m³ e 6,9 kN/m³, dependendo do teor de umidade, que variou entre 10,7% e 11,3%.

Esta espécie de madeira foi escolhida devido ao seu uso generalizado em construções de madeira colada, bem como às suas características que permitem uma boa aderência com o adesivo utilizado. As tábuas de madeira foram selecionadas para minimizar defeitos como nós e rachaduras, que poderiam influenciar os resultados dos testes.

O adesivo empregado foi uma resina à base de resorcinol, comercialmente conhecida como Cascophen RS-216-M, fabricada pela Alba S.A. O resorcinol é um adesivo amplamente utilizado em aplicações estruturais de madeira, devido à sua excelente resistência ao cisalhamento e durabilidade em ambientes úmidos e externos.

A preparação do adesivo seguiu rigorosamente as recomendações do fabricante, com a mistura da resina líquida e do catalisador em pó nas proporções recomendadas. A pesagem dos componentes

foi realizada em balança eletrônica da marca "Marte", com precisão até milésimos de grama, garantindo a precisão da formulação. O adesivo foi aplicado em temperatura ambiente, variando entre 20 °C e 30 °C, condições ideais para a cura do resorcinol.

3.2 FABRICAÇÃO DE AMOSTRAS DE TESTE (TSS)

Utilizando-se as equações de resistência dos materiais, Eq. (2) e (3), as resistências médias de *Eucalyptus grandis* (resistência média à tração normal às fibras 4,10 MPa, resistência média ao cisalhamento 15,1 MPa), e considerando que a ruptura dos corpos de prova ocorre indistintamente por tração normal às fibras ou por cisalhamento na linha adesiva, foram determinadas as dimensões dos corpos de prova. Eles foram fabricados a partir de vigas de madeira com dimensões de 6 x 16 cm, conforme especificado pelas normas, [24, 25], para testes de juntas estruturais de madeira. Para otimizar o uso da madeira e garantir consistência nos testes, algumas dimensões principais foram fixadas, Fig. 5.

Os corpos de prova, fabricados de acordo com [25], foram divididos em três grupos principais: 3 TSSs para testes de push-out, 3 TSSs para testes de cisalhamento da linha adesiva, 3 TSSs para testes de compressão normal na linha adesiva e 3 TSSs para testes de tensão normal na linha adesiva.

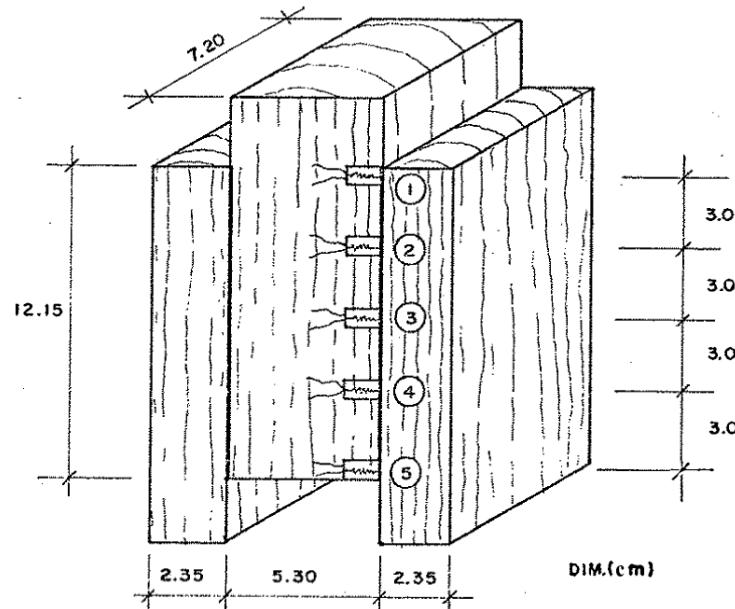
A fabricação dos TSSs envolveu uma preparação meticulosa das superfícies de madeira a serem coladas, garantindo que fossem lisas e livres de poeira e contaminantes. O adesivo foi aplicado uniformemente com pincel, e as peças foram unidas sob pressão controlada até que o adesivo estivesse totalmente curado, de acordo com os tempos especificados pelo fabricante (pressão de 1 MPa por 4 horas).

3.3 INSTRUMENTAÇÃO E EQUIPAMENTOS

Para medir as deformações na linha adesiva e avaliar as tensões durante os testes, extensômetros elétricos (SGs) foram instalados em locais estratégicos nos TSSs. Os SGs foram configurados em um circuito ponte de 1/4 de Wheatstone, conectado a uma placa analógica/digital de 12 bits, controlada por uma placa multiplexadora que permitia leituras com frequência ajustada a 1 Hz, garantindo a leitura precisa das deformações ao longo do tempo.

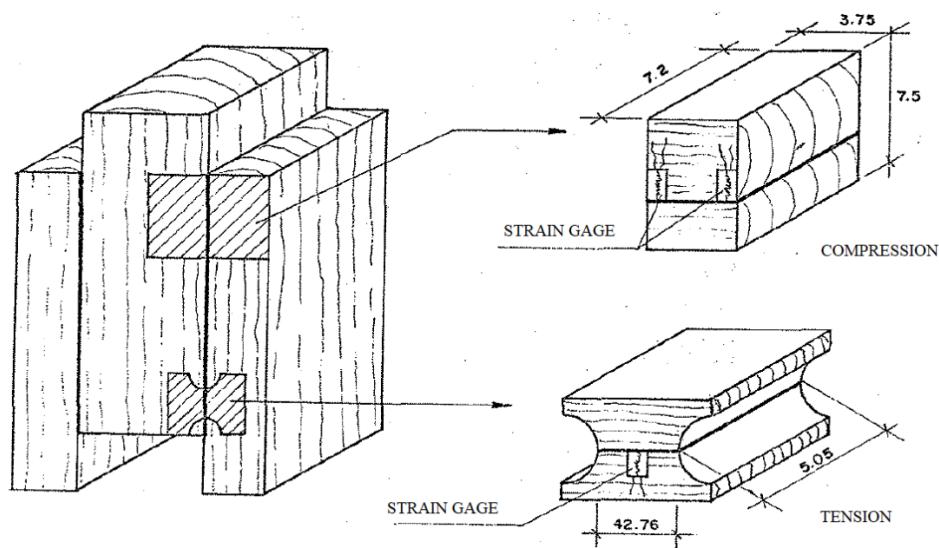
Nos TSSs do tipo "Push-out", cinco SGs foram posicionados ao longo da linha adesiva, conforme mostrado na Fig. 5.

Fig. 5. Modelo de amostra de teste (TS) e posição dos extensômetros elétricos (SGs).



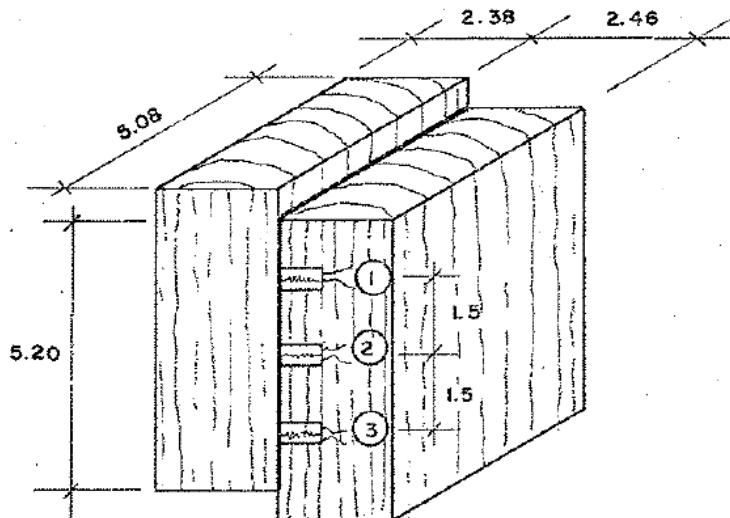
Para determinar o módulo de elasticidade normal às fibras em tensão e compressão, os TSs foram retirados do TS "Push-out", utilizando os SGs, conforme mostrado na Fig. 6.

Fig. 6. Amostras de teste de tensão e compressão.



Nos TSs de cisalhamento adesivo, três SGs foram instalados na linha adesiva, conforme esquematizado na Fig. 7.

Fig. 7. Posição dos extensômetros elétricos (SGs) no cisalhamento TS.



A instalação dos SGs seguiu procedimentos padronizados para garantir a correta aderência e minimização do ruído de medição. A calibração do sistema foi realizada antes de cada teste para garantir a precisão dos dados coletados.

Os ensaios de compressão, tração e cisalhamento foram realizados em uma máquina universal de ensaios Instron/Emic com capacidade de 300 kN. A máquina foi configurada para aplicar carga monotônica a uma taxa de 30 MPa por minuto. Durante os testes, as deformações nos SGs foram registradas para cada incremento de carga, até que os TSs se rompessem.

3.4 METODOLOGIAS DE TESTE

A metodologia de ensaio foi concebida para avaliar detalhadamente a resistência ao corte, à tração e à compressão de juntas de madeira coladas, utilizando TSs especialmente fabricados. Cada tipo de teste seguiu procedimentos padronizados para garantir a reproduzibilidade e precisão dos resultados. O uso de extensômetros elétricos em um circuito ponte de 1/4 de Wheatstone, conectado a uma placa analógica/digital de alta precisão, permitiu medições detalhadas de deformações, essenciais para a análise de tensões normais e de cisalhamento. O uso da máquina de teste universal garantiu a aplicação controlada de cargas, replicando com precisão as condições de serviço que as juntas coladas enfrentariam em aplicações reais.

A escolha das taxas de aplicação de carga foi baseada em estudos anteriores e recomendações de [25], com o objetivo de minimizar os efeitos da taxa de carregamento nos resultados. Essas práticas garantiram que os dados obtidos fossem representativos do comportamento real das juntas de madeira coladas, fornecendo uma base sólida para análise e comparação com os modelos teóricos existentes.

O teste de Push-out é fundamental para determinar a resistência ao cisalhamento de juntas coladas. Este teste consiste em aplicar uma força axial ao TS, empurrando uma seção central da peça até que ocorra a falha na linha adesiva. O teste envolveu a fixação dos TSs na máquina de ensaio universal Instron/Emic, com capacidade de 300 kN, configurada para aplicar uma carga monotônica crescente, a uma taxa de 25 MPa/min. A carga foi aplicada gradualmente, e as deformações foram medidas usando cinco extensômetros elétricos (SGs) posicionados ao longo da linha adesiva, conforme ilustrado na Fig. 5. Essas medidas foram registradas a cada 5 kN até a carga de ruptura de 144 kN. As leituras de SG permitiram a determinação de deformações transversais à linha adesiva. Os dados coletados foram utilizados para a construção de gráficos tensão-deformação, que mostram o comportamento do material desde o início da aplicação da carga até a ruptura completa. O valor máximo de cisalhamento foi calculado com base na carga máxima aplicada, de acordo com [25].

O ensaio de cisalhamento direto na linha adesiva foi projetado para comparar com a resistência ao cisalhamento obtida através do ensaio Push-out e para determinar a distribuição das tensões normais na linha adesiva e compará-la com a determinada no ensaio Push-out. O procedimento consistiu na fixação dos TSs na máquina universal, e a carga foi aplicada diretamente na linha adesiva a uma taxa de 25 MPa/min. Durante o teste, três SGs foram posicionados estratégicamente na linha adesiva para monitorar as deformações transversais, conforme mostrado na Fig. 7. As leituras de SG foram analisadas para determinar a distribuição de tensões normais ao longo da linha adesiva.

O teste de compressão normal foi realizado para determinar o módulo de elasticidade normal às fibras. Os TSs foram submetidos a uma carga axial crescente a uma velocidade de 10 MPa/min, conforme especificado em [25]. Os SGs, instalados nos TSs, registraram as deformações ao longo do ensaio, permitindo a determinação do módulo de elasticidade de compressão normal (Ecn). O módulo de elasticidade foi calculado usando a Lei de Hooke, e a distribuição de tensões normais foi analisada para identificar possíveis falhas na linha adesiva devido à compressão.

O teste de tensão normal foi realizado para avaliar a resistência da junta colada quando submetida a forças de tração aplicadas perpendicularmente à linha adesiva. Semelhante ao ensaio de compressão, os TSs foram submetidos a uma carga axial crescente, aplicada a uma taxa de 25 MPa/min. Os SGs, previamente instalados nas regiões de interesse, monitoraram as deformações. Este teste foi particularmente importante para avaliar a resistência da junta à tração perpendicular às fibras de madeira, uma das causas mais comuns de falha em juntas coladas. Os dados coletados foram utilizados para calcular o módulo de elasticidade em tensão normal (Etn) a partir dos gráficos tensão-deformação.

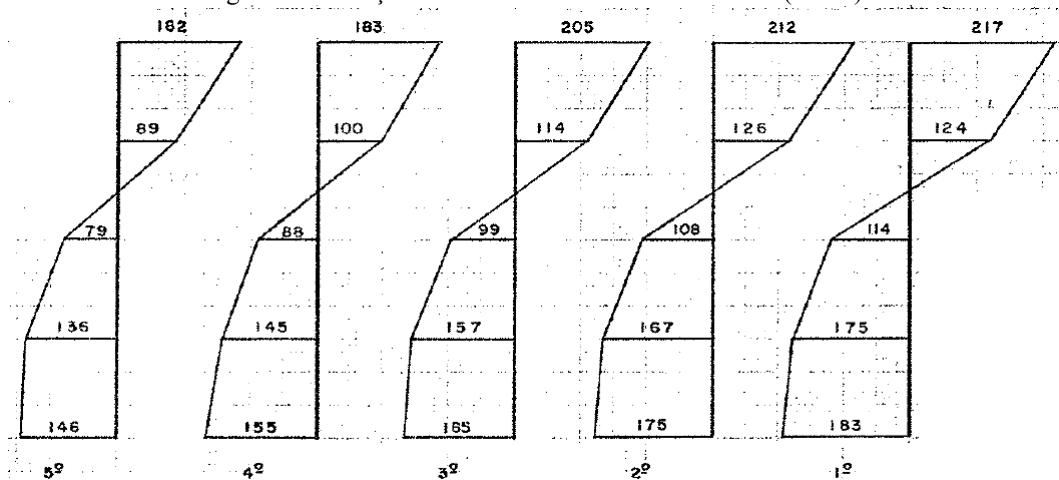
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais realizados forneceram dados detalhados sobre o comportamento das juntas de madeira coladas sob diferentes condições de carregamento. Os principais resultados obtidos para tensões normais e de cisalhamento em juntas coladas, utilizando TSs feitos de *Eucalyptus grandis* e adesivo à base de resorcinol, são apresentados a seguir.

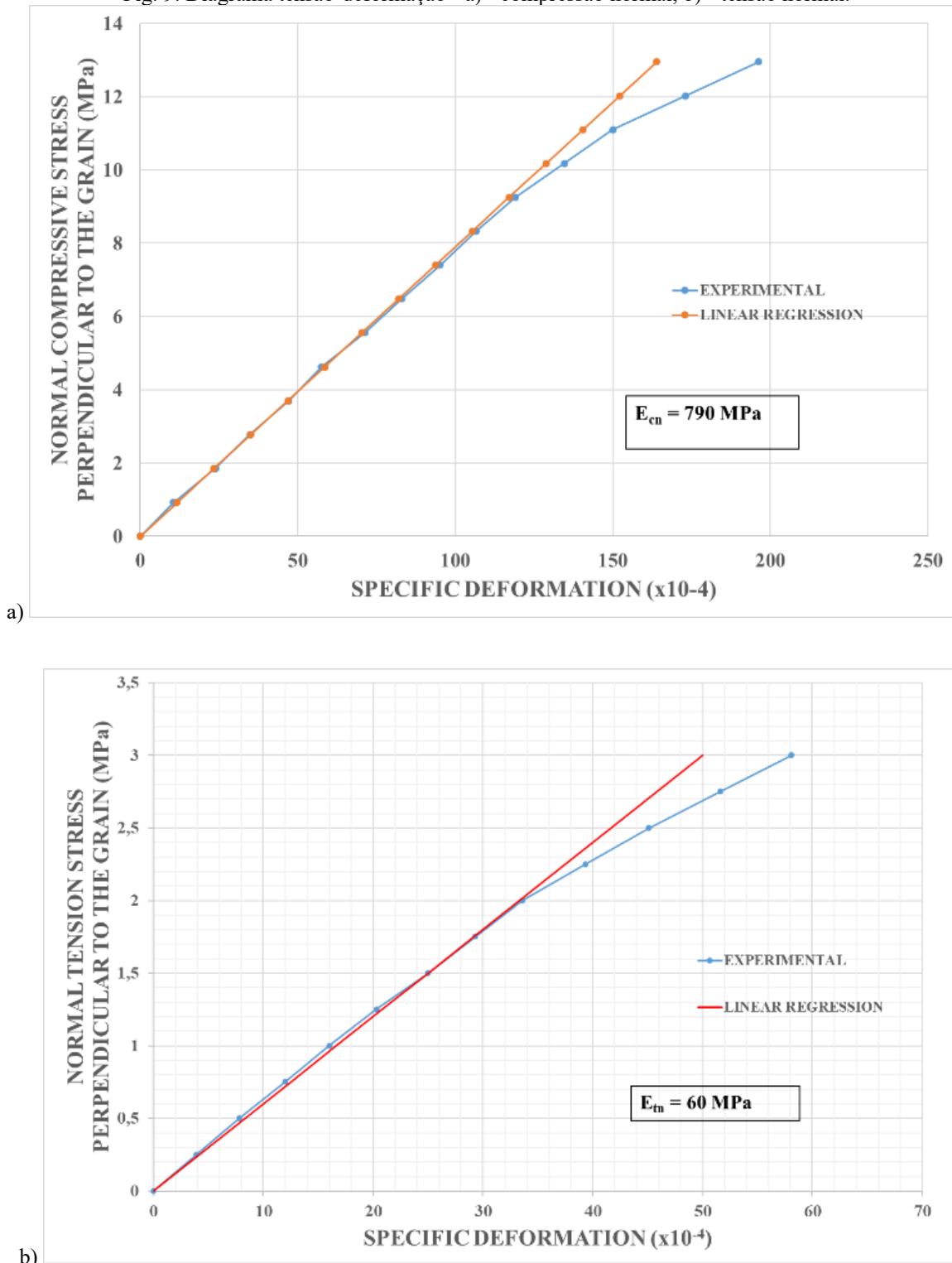
Nos testes de push-out, as cargas e deformações aplicadas nos 5 extensômetros elétricos foram registradas para cada um dos 3 TSs. A Fig. 8 mostra as cinco últimas leituras de deformações transversais (média dos 3 TSs).

Fig. 8. Deformações transversais - 5 últimas leituras - (x10-4).



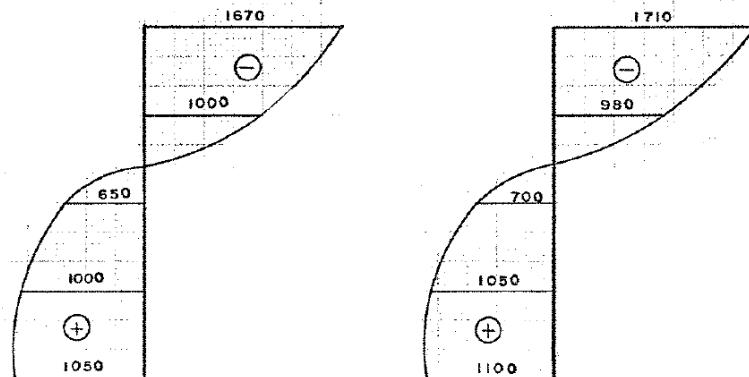
Nos ensaios de compressão e tração perpendiculares ao grão, com deformações medidas por SGs e carga aplicada, foram obtidos gráficos tensão-deformação conforme apresentado na Fig. 9 (média de 3 corpos de prova). Os módulos de elasticidade calculados a partir dos ensaios, para compressão e tensão perpendicular ao grão, foram: $E_{cn} = 790 \text{ MPa}$ e $E_{tn} = 60 \text{ MPa}$, respectivamente.

Fig. 9. Diagrama tensão-deformação - a) - compressão normal, b) - tensão normal.



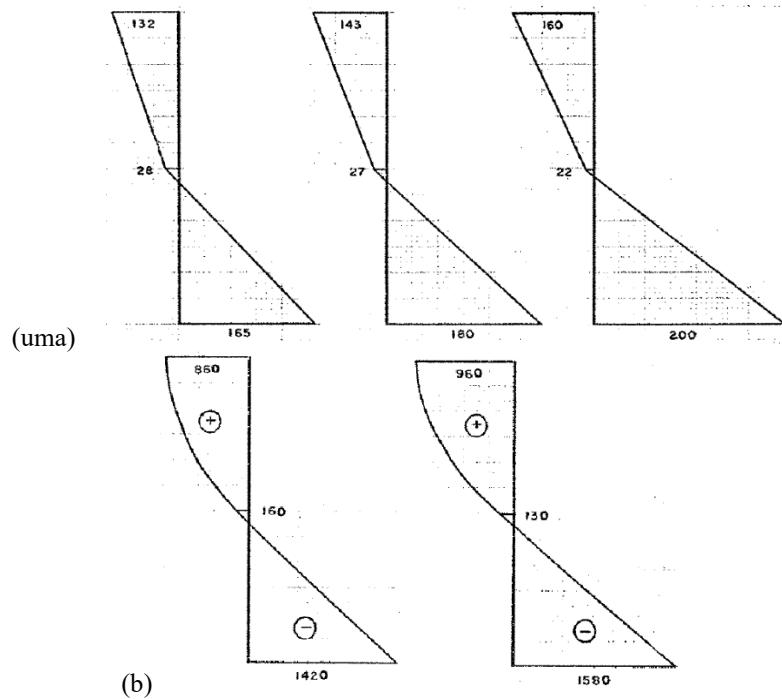
Aplicando a lei de Hooke e desconsiderando a influência das deformações em outras direções, a distribuição das tensões transversais pode ser obtida, conforme mostrado na Fig. 10 (valores médios para os 3 corpos de prova).

Fig. 10. Distribuição de tensões das 2 últimas leituras (N/cm²).



Nos ensaios de cisalhamento direto dos TSs, a Fig. 11.a mostra a distribuição das deformações para as três últimas leituras (valores médios dos corpos de prova). Usando os módulos normais de compressão e tensão de elasticidade, a distribuição das tensões transversais é obtida, conforme mostrado na Fig. 11.b.

Fig. 11. a) - Deformações transversais - 5 últimas leituras - (x10-4), b) - Distribuição de tensões das 2 últimas leituras (N/cm²).



4.2 DISCUSSÃO

Os resultados experimentais demonstraram um comportamento complexo de juntas de madeira coladas, especialmente no que diz respeito à distribuição das tensões normais e de cisalhamento ao longo da linha adesiva. Os testes de push-out e cisalhamento direto revelaram diferenças significativas

na resistência ao cisalhamento, enquanto os testes de compressão e tensão normais forneceram informações sobre a influência das tensões normais na resistência das juntas.

Um dos principais objetivos deste estudo foi verificar experimentalmente se a resistência ao cisalhamento determinada através do ensaio Push-out difere daquela obtida pelo ensaio de cisalhamento direto na linha adesiva. Os resultados indicaram que, de fato, há uma diferença significativa entre os dois métodos. O teste de Push-out mostrou uma resistência ao cisalhamento (τ_{ac}) menor do que a observada no teste de cisalhamento direto. Essa diferença pode ser atribuída à alta tensão de tração na linha adesiva no ensaio Push-out, onde a geometria do TS influencia a concentração de tensões nas extremidades da linha adesiva (devido à excentricidade da carga em relação à linha adesiva), conforme observado pelos autores [16, 18, 20].

Em contraste, o teste de cisalhamento direto, que aplica a carga com menor excentricidade em relação à linha adesiva, tende a refletir uma distribuição de tensões de tração mais baixas, resultando em maior resistência ao cisalhamento. Isso pode ser observado comparando a Fig. 10 (distribuição das tensões normais na linha adesiva no momento da ruptura dos corpos de prova Push-out) e a Fig. 11.b (distribuição das tensões normais na linha adesiva no momento da ruptura dos corpos de prova de cisalhamento direto). Na Figura 10, tanto as tensões de tração quanto as de compressão normais às fibras ao longo da linha adesiva estão na fase plástica, indicando claramente que a ruptura ocorreu devido à tensão normal e não ao cisalhamento. Na Fig. 11.b, apenas as tensões normais de tração nas fibras estão na fase plástica, o que pode indicar que a ruptura ocorreu devido ao cisalhamento da linha adesiva.

Esses achados corroboram estudos anteriores, como o de [27], que relataram variações na resistência ao cisalhamento em diferentes métodos de ensaio, enfatizando a importância de considerar a geometria do corpo de prova e a distribuição de tensões na interpretação dos resultados dos ensaios de juntas coladas. A confirmação de que o teste Push-out pode subestimar a resistência ao cisalhamento sugere a necessidade de ajustes metodológicos ou fatores de correção para alinhar os resultados de diferentes métodos de teste.

Outro objetivo crucial do estudo foi comprovar experimentalmente que a falha de juntas coladas, tanto no ensaio de Push-out quanto no ensaio de cisalhamento direto, ocorre devido a tensões normais, especialmente a tração perpendicular às fibras de madeira. A falha em juntas coladas foi frequentemente iniciada por trincas originadas de tensão perpendicular às fibras, confirmando a hipótese de que as tensões normais desempenham um papel crítico na determinação da resistência final da junta. Esse comportamento foi documentado em estudos anteriores, como o de [22], que destacou

que tensões normais, principalmente as de tração perpendicular, podem causar falhas prematuras em juntas coladas devido à baixa resistência da madeira nesse sentido.

Além disso, a comparação dos módulos de elasticidade normais à compressão (E_{cn}) e à tensão (E_{tn}) obtidos experimentalmente com valores encontrados na literatura confirmou a consistência dos resultados. O módulo de elasticidade em tensão foi significativamente menor do que na compressão, o que é consistente com a anisotropia da madeira, conforme descrito por [28]. A menor resistência da madeira à tração perpendicular às fibras explica a propensão das juntas coladas a falhar sob altas tensões normais, especialmente em aplicações onde as cargas transversais são predominantes.

A distribuição das tensões normais ao longo da linha adesiva foi outro foco de análise. Os resultados mostraram que essas tensões não são distribuídas uniformemente, sendo influenciadas pela geometria da junta e pela posição da carga aplicada. Observou-se que, na fase elástica, as tensões normais tendem a se concentrar nas extremidades da linha adesiva, conforme previsto pelos modelos teóricos de [14]. Na fase plástica, a distribuição de tensões tornou-se mais uniforme, indicando que a plastificação do adesivo reduz a concentração de tensões e potencialmente melhora a resistência da junta até um certo ponto antes da falha. Esse comportamento foi observado em testes anteriores e confirmado pela análise das deformações registradas nos GEs. Esses resultados são consistentes com o trabalho de [29] sobre distribuição de tensões em materiais anisotrópicos, onde sugerem que a geometria da junta e a rigidez diferencial entre os componentes colados podem resultar em concentrações de tensão que, se não forem abordadas, podem levar a falhas catastróficas. A aplicação dessas observações na prática de engenharia é fundamental para o desenvolvimento de juntas coladas mais fortes e duráveis.

Os resultados experimentais deste estudo corroboram as previsões teóricas baseadas na teoria clássica da resistência dos materiais e na teoria da fratura mecânica linear. A correspondência entre dados experimentais e modelos teóricos sugere que essas abordagens continuam sendo ferramentas valiosas para prever o comportamento de juntas de madeira coladas. No entanto, as simplificações inerentes a esses modelos, como a suposição de homogeneidade e isotropia dos materiais, podem não capturar todas as complexidades das interações entre madeira e adesivo.

Estudos anteriores, como os de [11], estabeleceram as bases para a análise de tensões em materiais sólidos, mas reconheceram as limitações ao aplicar essas teorias a materiais anisotrópicos como a madeira. Este estudo confirma a necessidade de considerar as características específicas da madeira, como sua anisotropia e a influência da umidade, ao aplicar essas teorias.

Além disso, a técnica dos elementos finitos, como sugerido por [16], pode oferecer uma análise mais detalhada e precisa das distribuições de tensões em juntas de madeira coladas. Estudos futuros

podem se beneficiar do uso de simulações tridimensionais para melhorar a precisão das previsões, especialmente em aplicações onde as tensões normais e de cisalhamento interagem de maneiras complexas.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste estudo foi investigar a influência das tensões normal e de cisalhamento na resistência de juntas de madeira coladas, utilizando corpos de prova de *Eucalyptus grandis* colados com resina de resorcinol. A pesquisa se concentrou em quatro aspectos principais: comparar a resistência ao cisalhamento determinada por meio do ensaio de Push-out com o ensaio de cisalhamento direto na linha adesiva; comprovando que a falha das juntas ocorre devido a tensões normais, especialmente tensão perpendicular às fibras; avaliar a distribuição dessas tensões ao longo da linha adesiva; e comparando os resultados experimentais com as teorias existentes. As principais conclusões a que se chegou são:

Em relação à diferença de resistência ao cisalhamento entre os ensaios de Push-out e de cisalhamento direto, o estudo confirmou que há uma diferença significativa na resistência ao cisalhamento quando determinada pelos dois métodos de teste. O ensaio Push-out apresentou menores valores de resistência ao cisalhamento em relação ao ensaio de cisalhamento direto na linha adesiva. Isso se deve à concentração de tensões nas extremidades da linha adesiva no teste de push-out, o que pode subestimar a resistência da junta. Esses resultados destacam a importância de considerar a geometria do corpo de prova e a distribuição de tensões ao interpretar os resultados dos ensaios de cisalhamento.

Em relação à influência das tensões normais na ruptura da junta, os resultados experimentais comprovaram que a falha das juntas coladas, tanto no ensaio de Push-out quanto no teste de cisalhamento direto, ocorre devido a tensões normais, especificamente tensão perpendicular às fibras. A baixa resistência da madeira à tração perpendicular foi identificada como um fator crítico que contribui para o início de falhas na linha adesiva, confirmando a importância das tensões normais na determinação da resistência final das juntas coladas.

Em relação à distribuição das tensões normais ao longo da linha adesiva, a análise das deformações medidas nos ensaios revelou que as tensões normais são distribuídas de forma não uniforme ao longo da linha adesiva, com concentração nas extremidades durante a fase elástica e distribuição mais uniforme na fase plástica. Esses achados são consistentes com as previsões teóricas e destacam a importância de considerar as concentrações de tensão no projeto de juntas coladas.

Os dados experimentais obtidos confirmaram a validade das teorias clássicas de resistência dos materiais e fratura mecânica linear para predizer o comportamento de juntas de madeira coladas. No entanto, as simplificações desses modelos podem não capturar todas as nuances das interações entre madeira e adesivo, especialmente em materiais anisotrópicos, como a madeira. A comparação com estudos anteriores reforça a importância de continuar a desenvolver e aplicar técnicas avançadas, como a análise de elementos finitos, para melhorar a precisão das previsões e a segurança das estruturas de madeira.

Este estudo contribuiu para uma compreensão detalhada do comportamento das juntas de madeira coladas, oferecendo dados experimentais que podem ser utilizados para aprimorar as práticas de engenharia e o desenvolvimento de normas técnicas. As conclusões obtidas enfatizam a necessidade de uma abordagem cuidadosa na análise de tensões em juntas coladas, considerando tanto as características do material quanto as particularidades dos métodos de ensaio. Os resultados fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações em engenharia de madeira, com o objetivo de garantir a segurança e durabilidade das estruturas construídas com este material sustentável.

A GRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e da Fapemig - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

- Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333-359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- Gregor, K., Reyer, C. P. O., Nagel, T. A., Mäkelä, A., Krause, A., Knoke, T., Rammig, A. (2024). Reconciling the EU forest, biodiversity, and climate strategies. *Global Change Biology*, 30(8), e17431. <https://doi.org/10.1111/gcb.17431>
- Antoine, E., Marquer, L., Muigg, B., Tegel, W., Bisson, U., Bolliger, M., Herzig, F., Heussner, K. U., Hofmann, J., Kontic, R., Kyncl, T., Land, A., Lechterbeck, J., Leuschner, H. H., Linderholm, H. W., Neyses-Eiden, M., Rösch, M., Rzepecki, A., Walder, F., Weidemüller, J., Westphal, T., Seim, A. (2024). Legacy of last millennium timber use on plant cover in Central Europe: Insights from tree rings and pollen. *Science of the Total Environment*, 922, e171157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171157>
- Putri, D. N., Santoso, A., Laksana, R. P. B., Akbar, F., Kusumah, S. S., Wibowo, E. S., Sutiawan, J., Lubis, M. A. R. (2024). Recent developments on ultra-low formaldehyde emitting system of tannin-based adhesive derived from tropical wood barks for wood-based products manufacturing: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 132, e103727. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103727>
- Shirmohammadi, Y., Pizzi, A., Raftery, G. M., Hashemi, A. (2023). One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 123, e103358. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103358>
- Chrobak, J., Ilowska, J., Chrobok, A. (2022). Formaldehyde-Free Resins for the Wood-Based Panel Industry: Alternatives to Formaldehyde and Novel Hardeners. *Molecules*, 1321(15), e4862. <https://doi.org/10.3390/molecules27154862>
- Kiskan, B., Yagci, Y. (2020). The Journey of Phenolics from the First Spark to Advanced Materials. *Israel Journal of Chemistry*, 61(1-2), 20-32. <https://doi.org/10.1002/ijch.201900086>
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331-351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3, 269-276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Ilgin, H. E., Aslantamer, Ö. N. (2024). High-Rise Timber Offices: Main Architectural and Structural Design Parameters. *Buildings*, 14(7), e1951. <https://doi.org/10.3390/buildings14071951>
- Timoshenko, S. P., Goodier, J. N. (1980). *Teoria da Elasticidade* (3^a ed.). Guanabara Dois.

Bartolucci, B., de Rosa, A., Bertolin, C., Berto, F., Penta, F., Siani, A. M. (2020). Mechanical properties of the most common European woods: A literature review. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 54, 249-274. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.54.18>

Williams, M. L. (1957). On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics*, 24(1), 1-4. <https://doi.org/10.1115/1.4011454>

Leicester, R. H. (1971). Some aspects of stress fields at sharp notches in orthotropic materials: I plane stress. *Technol. Pap. Div. Forest. Prod. CSIRO Australia*, 57.

Pan, Z. C., Ma, R. J., Wang, D. L., Chen, A. R. (2018). A review of lattice type model in fracture mechanics: Theory, applications, and perspectives. *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 382-409. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.12.037>

Leicester, R. H. (2006). Application of linear fracture mechanics to notched timber elements. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 8, 29-37. <https://doi.org/10.1002/pse.210>

Jalali, S., Borges, C. S. P., Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., Akhavan-Safar, A., Barbosa, A. S. O. F., Bordado, J. C. M., Silva, L. F. M. (2024). A novel technique for substrate toughening in wood single lap joints using a zero-thickness bio-adhesive. *Materials*, 17, e448. <https://doi.org/10.3390/ma17020448>

Ramachandrareddy, B., Solt-Rindler, P., Van Herwijnen, H. W. G., Pramreiter, M., Konnerth, J. (2024). Sensitivity of lap-shear test to errors in groove cutting and influence of wood type/treatment. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 130, e103605. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103605>

Conrad, M. P. C., Smith, G. D., Fernlund, G. (2004). Fracture of wood composites and wood-adhesive joints: A comparative review. *Wood and Fiber Science*, 36, 26-39.

Sciomenta, M., Gualtieri, P., Spera, L., Contu, F., Fragiacomo, M. (2024). Timber-timber composite (TTC) joints made of short-supply chain beech: Push-out tests of inclined screw connectors. *Materials and Structures*, 57(7), e171. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02443-6>

Sciomenta, M., Paoletti, A., Stamopoulos, A. G. (2024). Experimental investigation of the mode I fracture toughness behaviour of timber adhesive joints: The synergistic effect of the adhesive type and the bondline thickness. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 130, e103652. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103652>

Subhani, M., Lui, H. Y. (2024). Effect of primer and fibre orientation on softwood-hardwood bonding. *Journal of Composites Science*, 8(6), e192. <https://doi.org/10.3390/jcs8060192>

Musah, M., Ma, Y. X., Wang, X. P., Ross, R., Hosseinpourpia, R., Jiang, X. L., Xie, X. F. (2024). Face bonding strength of cross laminated northern hardwoods and softwoods lumber. *Construction and Building Materials*, 421, e135405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135405>

European Committee for Standardization. (2014). Eurocode 5: EN 1995-1-1: Design of wood structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira, parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, Brazil.

Betti, M., Brunetti, M., Lauriola, M. P., Nocetti, M., Ravalli, F., Pizzo, B. (2016). Comparison of newly proposed test methods to evaluate the bonding quality of Cross-Laminated Timber (CLT) panels by means of experimental data and finite element (FE) analysis. *Construction and Building Materials*, 125, 952-963. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.113>

Franke, B., Quenneville, P. (2014). Analysis of the fracture behavior of Radiata Pine timber and Laminated Veneer Lumber. *Engineering Fracture Mechanics*, 116, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.12.004>

Madhoushi, M. (2021). Pull-out strength of glued-in GFRP rods in timber connections by using of epoxy resin reinforced by nanoparticles. *Cerne*, 27, e102508. <https://doi.org/10.1590/01047760202127012508>