

**AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FALHA PARA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO EM JUNTAS ADESIVAS DE MADEIRA COM GRÃOS
INCLINADOS SOB CARGAS DE TENSÃO E COMPRESSÃO**

**EVALUATION OF FAILURE CRITERIA FOR SHEAR STRENGTH IN WOOD
ADHESIVE JOINTS WITH INCLINED GRAINS UNDER TENSION AND
COMPRESSION LOADS**

**EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE FALLO PARA LA RESISTENCIA AL
CIZALLAMIENTO EN JUNTAS ADESIVAS DE MADERA CON VETAS
INCLINADAS BAJO CARGAS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN**



<https://doi.org/10.56238/sevened2025.026-027>

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Doutoramento em Engenharia de Estruturas

Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Arquitetura, Belo Horizonte, MG, Brasil

E-mail: mantilla.carrasco@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7870-0283

Judy Norka Rodo Mantilla

<http://lattes.cnpq.br/3716965047168777>

¹ Doutoramento em Engenharia Civil

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, Brasil

E-mail: judynorka@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7426-0970

<http://lattes.cnpq.br/2270773118272768>

ABSTRACT

This study applied six failure criteria to estimate the shear strength of wood adhesive joints subjected to tension and compression loads as a function of fiber inclination. Shear stresses in the adhesive line were determined through experimental tests using specimens obtained from 12 Eucalyptus saligna beams. These specimens were prepared with variable fiber inclinations (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°) relative to the load application, following the NBR 7190 standard. The experimental results were statistically analyzed in conjunction with the six failure criteria (Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill, Hyperbolic, Keylwerth, and Karlsen), allowing for the adaptation of the models to determine the shear strength of the adhesive line as a function of fiber inclination. In their original form, the Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill, and Hyperbolic models did not show statistical significance ($p < 0.05$). However, after modifications, all models demonstrated statistical significance, with the best fits being provided by the DIN 1052, Keylwerth, Hankinson, Karlsen, Hyperbolic, and Tsai-Hill models, in order of significance. Due to ease of application, the most recommended models for predicting the shear strength values of the adhesive line under compression and tension, as a function of fiber inclination, are the DIN 1052 and Hankinson formulas.

Keywords: Shear strength; Fiber inclination; Adhesive joints; Tension; Compression.

RESUMO

Este estudo aplicou seis critérios de falha para estimar a resistência ao cisalhamento de juntas adesivas de madeira submetidas a cargas de tensão e compressão em função da inclinação das fibras. As tensões

de cisalhamento na linha adesiva foram determinadas por meio de testes experimentais usando corpos de prova obtidos de 12 vigas de *Eucalyptus saligna*. Esses corpos de prova foram preparados com inclinações variáveis das fibras (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90°) em relação à aplicação da carga, seguindo a norma NBR 7190. Os resultados experimentais foram analisados estatisticamente em conjunto com os seis critérios de falha (Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill, Hiperbólico, Keylwerth e Karlsen), permitindo a adaptação dos modelos para determinar a resistência ao cisalhamento da linha adesiva em função da inclinação das fibras. Em sua forma original, os modelos Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill e Hyperbolic não apresentaram significância estatística ($p < 0,05$). Entretanto, após as modificações, todos os modelos demonstraram significância estatística, com os melhores ajustes sendo fornecidos pelos modelos DIN 1052, Keylwerth, Hankinson, Karlsen, Hyperbolic e Tsai-Hill, em ordem de significância. Devido à facilidade de aplicação, os modelos mais recomendados para a previsão dos valores de resistência ao cisalhamento da linha adesiva sob compressão e tensão, em função da inclinação da fibra, são as fórmulas DIN 1052 e Hankinson.

Palavras-chave: Resistência ao cisalhamento; Inclinação da fibra; Juntas adesivas; Tensão; Compressão.

RESUMEN

En este estudio se aplicaron seis criterios de fallo para estimar la resistencia al cizallamiento de uniones adhesivas de madera sometidas a cargas de tracción y compresión en función de la inclinación de las fibras. Los esfuerzos cortantes en la línea adhesiva se determinaron mediante ensayos experimentales utilizando probetas obtenidas de 12 vigas de *Eucalyptus saligna*. Esas probetas fueron preparadas con inclinaciones variables de las fibras (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° y 90°) en relación a la aplicación de la carga, siguiendo la norma NBR 7190. Los resultados experimentales se analizaron estadísticamente en conjunción con los seis criterios de fallo (Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill, Hiperbólico, Keylwerth y Karlsen), permitiendo la adaptación de los modelos para determinar la resistencia al cizallamiento de la línea adhesiva en función de la inclinación de la fibra. En su forma original, los modelos Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill e Hiperbólico no mostraron significación estadística ($p < 0,05$). Sin embargo, tras las modificaciones, todos los modelos demostraron significación estadística, siendo los modelos DIN 1052, Keylwerth, Hankinson, Karlsen, Hiperbólico y Tsai-Hill los que proporcionaron los mejores ajustes, en orden de significación. Debido a su facilidad de aplicación, los modelos más recomendados para predecir los valores de resistencia al cizallamiento de la línea adhesiva bajo compresión y tensión, en función de la inclinación de la fibra, son las fórmulas DIN 1052 y Hankinson.

Palabras clave: Resistencia al cizallamiento; Inclinación de la fibra; Juntas adhesivas; Tensión; Compresión.

1 INTRODUÇÃO

A madeira, um polímero natural composto principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, tem sido um material de construção essencial devido às suas propriedades mecânicas e sustentabilidade. A celulose, principal componente estrutural, confere resistência e rigidez à madeira, enquanto a hemicelulose e a lignina oferecem coesão e flexibilidade. A estrutura polimérica da madeira, com suas fibras especificamente orientadas, desempenha um papel crucial na determinação de suas propriedades mecânicas, como resistência à compressão e à tração [1].

O comportamento da madeira sob carga compressiva, especialmente quando aplicada em ângulo com as fibras, tem sido extensivamente estudado [2-7], com a influência variando de acordo com a espécie de madeira. No entanto, poucos estudos abordam a influência da inclinação das fibras na resistência ao cisalhamento em juntas coladas sob compressão, e ainda há controvérsia sobre quais teorias de falha são mais apropriadas [8-12]. Por outro lado, a influência da inclinação da fibra na resistência ao cisalhamento sob tensão é ainda menos explorada, com poucos estudos disponíveis [13-21].

Polímeros adesivos, como resinas epóxi, poliuretano e fenol-formaldeído, são amplamente utilizados para formar juntas coladas entre elementos de madeira. Esses adesivos são escolhidos por suas propriedades de adesão química, resistência ao envelhecimento e capacidade de formar ligações duráveis mesmo sob condições adversas [22]. A resistência ao cisalhamento da linha adesiva é uma propriedade crítica que determina a eficácia das juntas coladas. Essa resistência é influenciada por vários fatores, incluindo a composição química do adesivo, a preparação das superfícies da madeira, o método de aplicação do adesivo e as condições de cura. A interação entre o adesivo e a madeira também é significativamente afetada pela inclinação das fibras da madeira em relação à linha adesiva [23].

A madeira é um material único e variável devido aos seus defeitos naturais e características anisotrópicas. Assim, as teorias de falha são bastante complexas [24-26]. Não há critérios de falha específicos para determinar a resistência ao cisalhamento da linha adesiva em compressão em função da inclinação da fibra de madeira. Existem apenas critérios de falha para compressão, tração e cisalhamento da madeira [24, 27, 28]. Dentre os inúmeros critérios de falha, as fórmulas de Hankinson, Karlsen, DIN-1052, Keylwerth, Hiperbólica e Tsai-Hill são as mais utilizadas para estimar a resistência da madeira quando carregada em ângulo com as fibras.

Pesquisadores como [3, 29-33] estudaram a influência da direção da aplicação da carga em relação às fibras de madeira na resistência ao cisalhamento, usando princípios e teorias aplicadas à resistência à compressão da madeira. Alguns estabeleceram modelos teóricos, geralmente considerando madeira ortotrópica, enquanto outros estabeleceram modelos empíricos com base nos resultados dos testes. Os tipos de falhas que podem ocorrer em corpos de prova, devido à anisotropia do material, são difíceis e complicados de avaliar devido à interação de vários mecanismos, como

defeitos de material, condições de aplicação de carga, condições ambientais e propriedades mecânicas da madeira em diferentes direções [25].

A análise integrada de estudos sobre resistência ao cisalhamento sob ações de compressão e tração permite uma compreensão abrangente das propriedades mecânicas de juntas de madeira coladas. Foram realizados ensaios experimentais com corpos de prova obtidos de 12 vigas de *Eucalyptus saligna*, confeccionadas com inclinações de fibras variadas (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°) em relação à aplicação da carga, seguindo as prescrições [39]. Os resultados dos testes foram analisados usando seis critérios de falha: Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill, Hyperbolic, Keylwerth e Karlsen.

A análise estatística robusta dos resultados permitiu a adaptação de modelos para determinar a resistência ao cisalhamento da linha adesiva em função da inclinação da fibra de madeira. Inicialmente, os modelos de Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill e Hyperbolic não apresentaram significância estatística em seu formato original. No entanto, com as modificações feitas nos modelos, todas as formulações apresentaram significância estatística, com melhor ajuste, em ordem de significância: DIN 1052, Keylwerth, Hankinson, Karlsen, Hiperbólica e Tsai-Hill.

A facilidade de aplicação dos modelos também foi considerada, sendo os modelos mais adequados para a predição dos valores de resistência ao cisalhamento da linha adesiva, tanto sob compressão quanto sob tração, em função da inclinação da fibra, as fórmulas DIN 1052 e Hankinson. Esses modelos fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de juntas coladas mais eficientes, contribuindo significativamente para a engenharia de materiais e a construção de estruturas de madeira.

Assim, a madeira, como polímero natural, e os polímeros adesivos usados em juntas coladas desempenham papéis cruciais na determinação das propriedades mecânicas e do desempenho estrutural das construções de madeira. A investigação detalhada das interações entre madeira e adesivos, considerando a orientação da fibra e as condições de carga, é essencial para o desenvolvimento de modelos preditivos precisos e a otimização de juntas coladas em aplicações estruturais. Este estudo fornece uma compreensão abrangente e integrada das propriedades mecânicas das juntas coladas, fornecendo dados valiosos para o projeto e construção de estruturas de madeira mais seguras e duráveis.

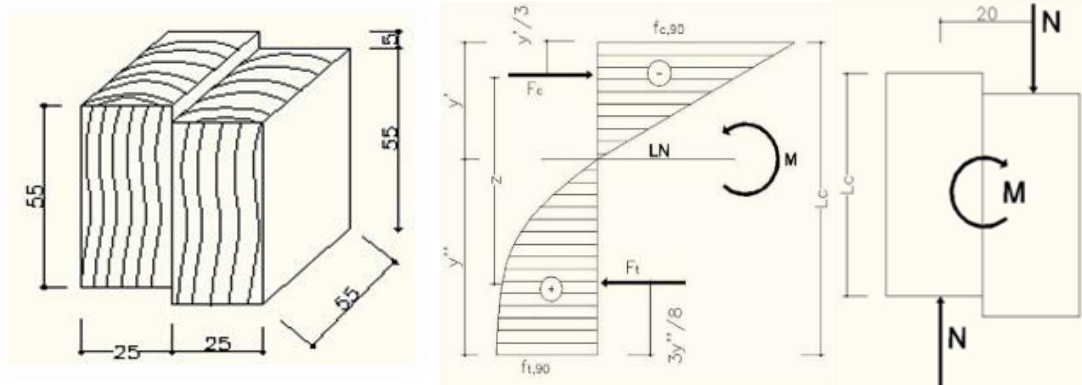
2 METODOLOGIA

2.1 ANÁLISE TEÓRICA

A análise teórica dos corpos de prova de cisalhamento (TSs) para a linha adesiva sob compressão foi realizada considerando a teoria clássica da resistência do material. A Figura 1a ilustra o modelo de ensaio para determinação do cisalhamento sob compressão, enquanto a Figura 1b mostra o equilíbrio estático e a Figura 1c apresenta a distribuição de tensões. Na Figura 2a, é mostrado o TS para o cisalhamento da linha adesiva sob tração, composto por duas placas de madeira cobrindo a junta (conexão colada). A carga transferida neste tipo de junta ocorre através das tensões de cisalhamento da

linha adesiva. Devido à descontinuidade do material nos TSs, a falha pode ocorrer por tensão ou compressão perpendicular às fibras. A análise simplificada considerou a teoria clássica dos materiais, sendo a distribuição de tensões ao longo da linha adesiva não linear na fase elástica e uniforme na fase plástica, conforme ilustrado na Figura 2b.

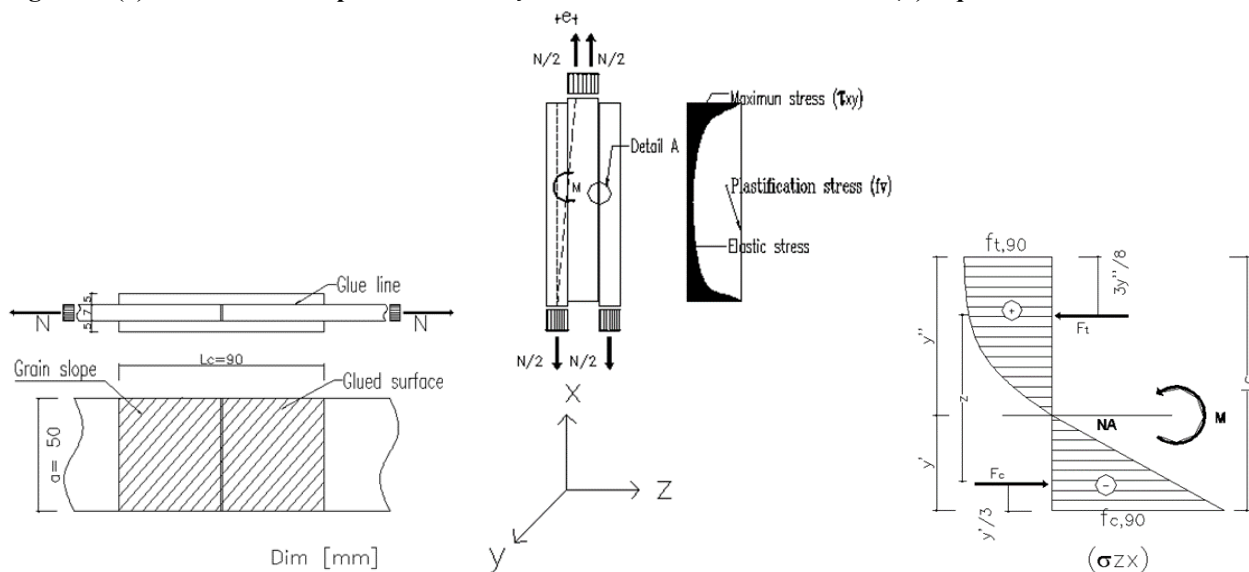
Figura 1. (a) Modelo de teste para determinar o cisalhamento sob compressão, (b) Equilíbrio estático e (c) Distribuição de tensões.



a) b) c)

Fonte: Os autores

Figura 2. (a) Modelo de teste para determinação do cisalhamento sob tensão e (b) Equilíbrio estático.



a) b) c)

Fonte: Os autores

Para verificar o modo de ruptura, considerou-se a distribuição de tensões através da linha adesiva, que apresenta formato triangular na zona comprimida e parabólica na zona tensionada, conforme ilustrado nas Figuras 1c e 2c. Essa distribuição se deve à maior resistência da madeira à compressão perpendicular às fibras em comparação com a tensão perpendicular às fibras.

A análise teórica da distribuição de tensões foi realizada por meio das seguintes equações:

Equilibrando forças, temos:

$$\sum F_h = 0 \rightarrow F_c = F_t \rightarrow \frac{f_{c,90} \cdot y' \cdot a}{2} = \frac{2 \cdot f_{t,90} \cdot y'' \cdot a}{3} \quad (1)$$

$$\sum M_{L.N.} = 0 \rightarrow M = F_c \left(y' - \frac{y'}{3} \right) + M = F_t \left(y'' - \frac{3 \cdot y''}{8} \right) \quad (2)$$

$$\text{the location of the NA is } y' = \frac{L_c}{\left(\frac{3f_{c,90}}{4f_{t,90}} + 1 \right)} \text{ and } y'' = \frac{L_c}{\left(\frac{4f_{t,90}}{3f_{c,90}} + 1 \right)} ; z = \frac{2y'}{3} + \frac{5y''}{8} \quad (3)$$

$$L_c = y' + y'' ; M = N \cdot e \quad (4)$$

Onde $f_{c,90}$ é a resistência da madeira à tensão de compressão perpendicular ao grão, $f_{t,90}$ é a resistência da madeira à tensão de tração perpendicular ao grão, M é o momento fletor, NA é o eixo neutro, L_c é o comprimento da linha de cola, y' é a distância do grão superior ao eixo neutro, y'' é a distância do grão inferior ao eixo neutro, a é a largura da peça, f_v é a resistência da madeira à tensão de cisalhamento, e é a excentricidade da carga aplicada e Ac é a superfície colada.

Portanto, a falha da junta colada ocorre quando a tensão de cisalhamento em todos os pontos da linha adesiva atinge o valor de plastificação da tensão de cisalhamento do adesivo ou da interface adesivo-madeira.

2.2 TEORIAS DE FALHA PARA MADEIRA

As seis fórmulas apresentadas abaixo são derivadas da aplicação de vários critérios de falha usados para obter a resistência à compressão inclinada para as fibras, mas podem ser usadas para prever a resistência ao cisalhamento da fibra inclinada sob carga de tração ou compressão [20, 33]. De acordo com [3], o modelo empírico proposto por Hankinson recomenda o uso do expoente ($n=2$). [34] recomendam um modelo empírico com um expoente ($n = 3$) (Karlsen). O padrão [35] DIN 1052 usa a equação com um expoente ($n = 1$). Keylwerth [33] desenvolveu uma expressão empírica com um expoente ($n=2$) para a variação do módulo de elasticidade em função da inclinação da fibra, que para as forças assume uma forma específica. [28] e [24] apresentam a teoria de Tsai-Hill como uma extensão do critério de Von Mises para materiais isotrópicos, enquanto [36] propõe uma fórmula hiperbólica com um expoente ($n = 0,01$).

As seguintes equações foram modificadas para prever a resistência ao cisalhamento da linha adesiva sob compressão e tensão inclinada às fibras de madeira:

$$f_{va?,\theta} = \frac{f_{va?,0} \times f_{va?,90}}{f_{va?,0} \times \sin(\theta)^n + f_{va?,90} \times \cos(\theta)^n} \quad (5)$$

$$f_{va?,\theta} = \frac{f_{va?,0}}{1 + \left(\frac{f_{va?,0}}{f_{va?,90}} + 1\right) \times \sin(\theta)^n} \quad (6)$$

$$f_{va?,\theta} = f_{va?,0} - (f_{va?,0} - f_{va?,90}) \times \sin(\theta)^n \quad (7)$$

$$f_{va?,\theta} = \frac{f_{v,0}}{\left(\cos(\theta)^n - \frac{f_{va?,0}}{f_{va?,90}} \times \sin(\theta)^n\right) \times \cos(2\theta) + \frac{f_{va?,0}}{f_{va?,45}} \times \sin(2\theta)^n} \quad (8)$$

$$\frac{1}{f_{va?,\theta}^2} = \frac{\cos(\theta)^{2n}}{f_{va?,0}^2} - \frac{\cos(\theta)^n \sin(\theta)^n}{f_{va?,0}^2} + \frac{\sin(\theta)^{2n}}{f_{va?,90}^2} \quad (9)$$

$$f_{va?,\theta} = \frac{f_{vac,0} \times f_{vac,90}}{f_{va?,0} \sinh(n\theta) + f_{va?,90} \cosh(n\theta)} \quad \text{ou} \quad (10)$$

$$f_{vac,\theta} = \frac{2f_{vac,0} \times f_{vac,90}}{e^{n\theta}(f_{va?,0} + f_{va?,90}) + e^{-n\theta}(f_{va?,90} - f_{va?,0})}$$

Onde: $f_{va?, \square}$ = resistência ao cisalhamento inclinada às fibras sob compressão ou tração, $f_{va?, \square}$ = resistência ao cisalhamento paralela às fibras sob compressão ou tração, $f_{va?, \square\square}$ = resistência ao cisalhamento normal às fibras sob compressão ou tensão, $f_{va?, \square\square}$ = resistência ao cisalhamento a 45 graus em relação às fibras quando submetidas a compressão ou tensão, e θ = ângulo entre as fibras e a aplicação da carga.

Há controvérsia entre os autores sobre o valor do expoente (n) dos termos trigonométricos nas equações 4 a 8. Alguns autores indicam coeficientes diferentes dependendo do tipo de carregamento, enquanto outros indicam coeficientes diferentes para diferentes teores de umidade da madeira.

2.3 MATERIAIS

Para garantir uma amostragem representativa, as vigas de madeira foram selecionadas aleatoriamente em pequenos lotes de serrarias em diferentes momentos. A madeira utilizada para os STs foi *Eucalyptus saligna* (*E. saligna* Sm., *Myrtaceae*), com espessura máxima de 55 mm e larguras variadas. O teor de umidade da madeira variou de 11,44% a 25,33%, enquanto a densidade aparente variou entre 690 kg/m³ e 860 kg/m³. Essa variação é relevante para garantir que os resultados do teste sejam amplamente aplicáveis a diferentes condições de umidade e densidade encontradas na prática.

A escolha dos adesivos baseou-se no princípio de que a madeira, por ser altamente polar, apresenta boa afinidade com adesivos de polaridade semelhante ou intermediária. De acordo com [22, 37, 38], os adesivos mais adequados para aplicações estruturais incluem acetato de polivinila, fenol-formaldeído, resorcinol-formaldeído, uréia-formaldeído, melamina e melamina-uréia-formaldeído. Para os testes, foi escolhido um adesivo à base de resorcinol. Este adesivo consiste em uma resina líquida utilizada com um catalisador em pó, com proporções recomendadas pelo fabricante (Hexion Chemical Industry and Trade). Tanto a resina quanto o catalisador foram pesados em uma balança eletrônica com precisão centígrama e depois misturados até a homogeneização completa. A temperatura durante o preparo e aplicação variou de 20°C a 30°C.

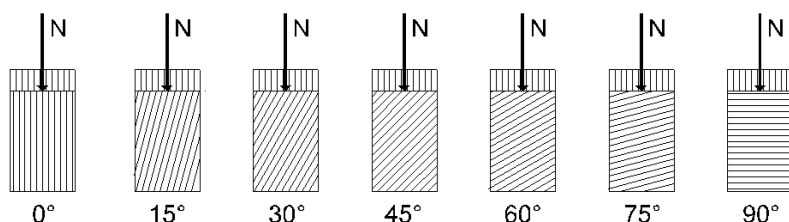
Os TSs foram confeccionados a partir de doze vigas escolhidas aleatoriamente, cujas superfícies foram cuidadosamente preparadas. O adesivo foi aplicado por escovação, seguido da aplicação de pressão de 1,5 MPa, conforme recomendação do fabricante. Essa pressão foi mantida por um período mínimo de oito horas para garantir a cura adequada do adesivo.

2.4 AMOSTRAS DE TESTE (TSS)

Avaliar a resistência ao cisalhamento da linha adesiva sob compressão

Foram confeccionados 96 STs, sendo 84 STs para ensaios de cisalhamento de linha adesiva, sendo um dos elementos TS colado com fibras inclinadas em relação à aplicação da carga (12 STs para cada inclinação) e 12 STs para umidade e densidade (segundo as recomendações de [39] e [40]), Figura 3.

Figura 3. Corpos de prova com inclinação variável da fibra em relação à carga aplicada.

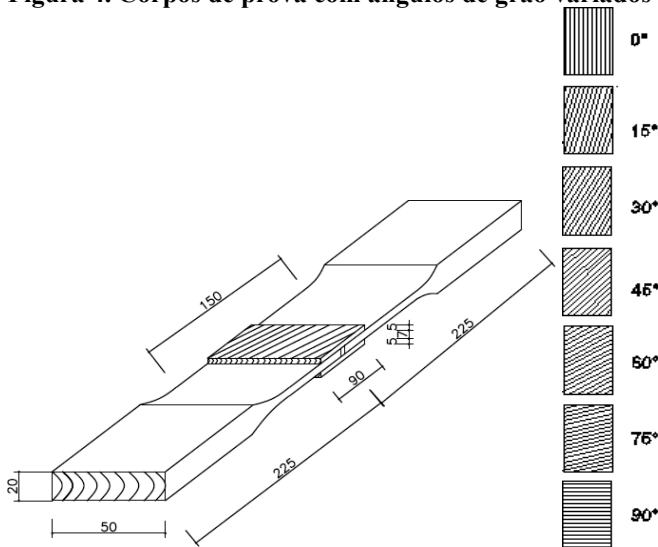


Fonte: Os autores

Para avaliar a resistência ao cisalhamento da linha adesiva sob tensão

Os STs foram dimensionados de acordo com os STs de tração propostos por [41] e a norma brasileira [39]. As placas laterais dos STs foram preparadas variando a inclinação das fibras de madeira em relação à carga aplicada (Figura 4). Foram confeccionados 96 STs, sendo 84 STs para ensaios de resistência ao cisalhamento da linha adesiva, com as placas laterais de madeira coladas com fibras em ângulo relativo à aplicação da carga (12 STs por ângulo) e 12 STs para umidade e densidade (segundo as recomendações de [39] e [40]), Figura 4.

Figura 4. Corpos de prova com ângulos de grão variados em relação à carga aplicada (mm).



Fonte: Os autores

Para caracterização de madeira

As dimensões dos TSs para ensaios de cisalhamento foram: 6,4 cm x 5 cm x 5 cm, com um pequeno degrau de 1,4 cm x 2 cm x 5 cm para fixação do equipamento de teste, e uma área colada de 5 cm x 5 cm. Para determinar a umidade e a densidade, as dimensões foram: 2 cm x 3 cm x 5 cm [39, 40].

2.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de cisalhamento da linha adesiva, tanto sob compressão quanto sob tração, foram realizados em uma máquina universal de ensaios Instron/Emic com capacidade de 300 kN. A carga aplicada foi monotônica a uma taxa de 2,5 MPa por minuto até que os TSs falhassem. Observou-se uma falha abrupta e instantânea dos corpos de prova, caracterizando uma falha frágil. Após cada ensaio de cisalhamento, foram realizados ensaios de umidade e densidade para obtenção de valores no momento do ensaio, permitindo a correção do resultado para o teor de umidade de referência de 12%. Para isso, foi utilizada a equação 11 [39].

$$f_{va?,\theta,12} = f_{va?,\theta,U\%} \left(1 + \frac{2 \times (U\% - 12)}{100} \right) \quad (11)$$

Onde: $f_{va?,\theta,12}$ = resistência ao cisalhamento da linha adesiva sob compressão ou tensão inclinada em um ângulo (θ) em relação às fibras de madeira, com o teor de umidade de referência de 12%; $f_{va?,\theta,U\%}$ = resistência ao cisalhamento da linha adesiva sob compressão ou tensão inclinada em um ângulo (θ) em relação às fibras de madeira, com o teor de umidade $U\%$, no momento do teste.

Para a análise estatística dos resultados dos testes, utilizou-se o programa Minitab 16, especialmente para testes de hipótese nula e ANOVA one-way.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados aqui apresentados são cruciais para entender como a madeira e os adesivos poliméricos interagem sob diferentes condições de carregamento e como essas interações afetam a integridade estrutural.

A Tabela 1 apresenta os resultados das tensões de cisalhamento na falha do adesivo sob compressão, tração e na madeira, corrigidos para o teor de umidade de referência de 12%. As tensões variam com a inclinação das fibras de madeira, demonstrando a influência significativa da orientação da fibra na resistência ao cisalhamento.

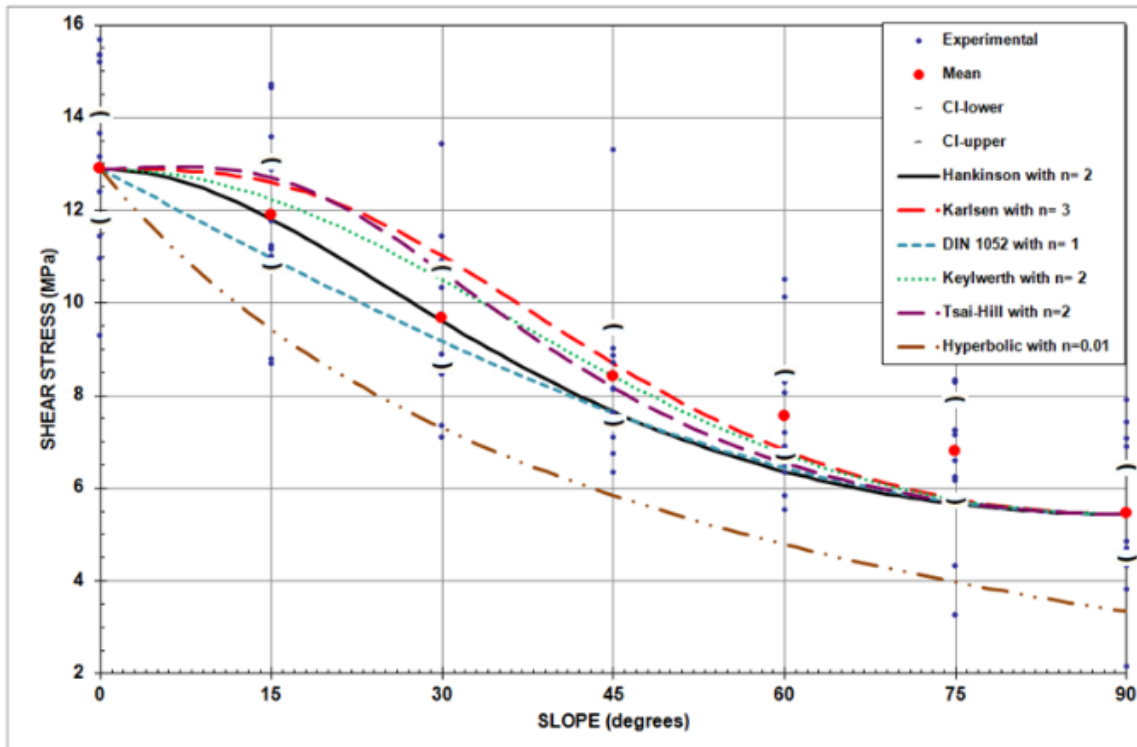
A Figura 5 mostra o gráfico da tensão de cisalhamento adesiva sob compressão versus inclinação da fibra, exibindo os valores experimentais (incluindo o intervalo de confiança) e as seis equações com o expoente sugerido pelos autores. Nota-se que as curvas de todas as equações estão fora do intervalo de confiança dos resultados experimentais para pelo menos uma inclinação de fibra, indicando que os expoentes "n" das equações devem diferir daqueles sugeridos pelos autores.

Tabela 1: Tensão de cisalhamento da linha adesiva sob compressão, tração e tensão de cisalhamento da madeira, corrigida para umidade padrão de 12% (MPa).

B	Ty	0o	15o	30o	45o	60o	75o	90o	B	Ty	0o	15o	30o	45o	60o	75o	90o
1	C	11.43	11.02	10.91	8.13	6.90	4.32	3.81	7	C	10.95	8.79	7.10	6.74	5.54	5.66	4.69
	T	10.19	9.27	8.96	3.09	2.99	1.96	1.75		T	13.84	11.68	11.92	5.06	2.65	1.56	1.08
	W	15.65	12.87	12.25	13.28	10.09	9.06	8.44		W	12.64	12.04	10.95	9.63	8.43	7.34	6.50
2	C	14.15	11.76	10.86	9.47	8.27	8.27	7.07	8	C	13.16	13.13	11.45	8.16	10.13	7.89	7.89
	T	7.97	7.07	7.37	1.59	1.00	0.80	0.40		T	13.29	11.84	11.84	3.82	2.24	1.45	1.18
	W	17.14	15.44	14.35	11.36	12.95	10.16	9.76		W	14.47	11.97	10.00	9.60	9.74	6.71	6.97
3	C	9.29	8.68	7.35	6.33	5.82	3.27	2.14	9	C	13.66	12.88	9.75	8.71	8.06	7.15	6.50
	T	9.60	9.60	8.68	5.92	3.27	2.25	0.82		T	12.62	12.49	10.01	7.67	4.03	1.17	1.04
	W	18.68	16.95	14.19	11.84	11.64	11.74	12.56		W	15.87	15.35	13.40	15.35	9.23	10.93	9.49
4	C	15.34	14.65	10.32	8.85	6.88	6.59	4.33	10	C	15.68	13.58	13.44	13.30	10.50	10.50	7.42
	T	12.00	10.03	7.57	5.80	2.85	1.87	1.28		T	14.42	13.72	13.16	7.70	4.48	1.82	0.84
	W	17.85	16.12	14.75	12.68	13.08	13.47	11.31		W	17.78	16.10	12.32	13.44	11.90	11.06	11.48
5	C	15.35	14.71	8.47	7.09	7.20	7.24	6.88	11	C	11.72	11.23	8.88	7.63	6.34	6.24	4.90
	T	11.11	10.16	9.21	6.56	3.60	2.75	1.91		T	10.26	9.31	8.51	4.78	2.66	1.56	1.01
	W	14.29	9.53	9.84	12.28	11.43	7.94	7.94		W	15.19	12.98	11.97	11.08	9.76	8.85	8.30
6	C	12.39	11.15	8.56	9.01	8.56	8.33	4.84	12	C	11.62	11.16	8.80	7.51	6.52	6.15	4.81
	T	11.60	10.02	8.22	6.76	2.93	1.46	0.45		T	10.18	9.23	8.42	4.68	2.61	1.50	0.90
	W	14.08	14.19	11.60	10.47	10.14	9.01	8.22		W	14.05	12.14	11.33	10.83	9.72	8.78	8.22
M	C	12,90	11,90	9,66	8,41	7,56	6,80	5,44	SD	C	2,00	1,98	1,83	1,81	1,59	1,92	1,71
	T	11,42	10,37	9,49	5,29	2,94	1,68	1,06		T	1,90	1,78	1,86	1,84	0,89	0,50	0,45
	W	15,64	13,81	12,25	11,82	10,68	9,59	9,10		W	1,87	2,23	1,64	1,69	1,49	1,95	1,87

B = Viga, Ty = Tipo, C = Compressão, T = Tensão, W = Madeira, M = Média, SD = Desvio Padrão.

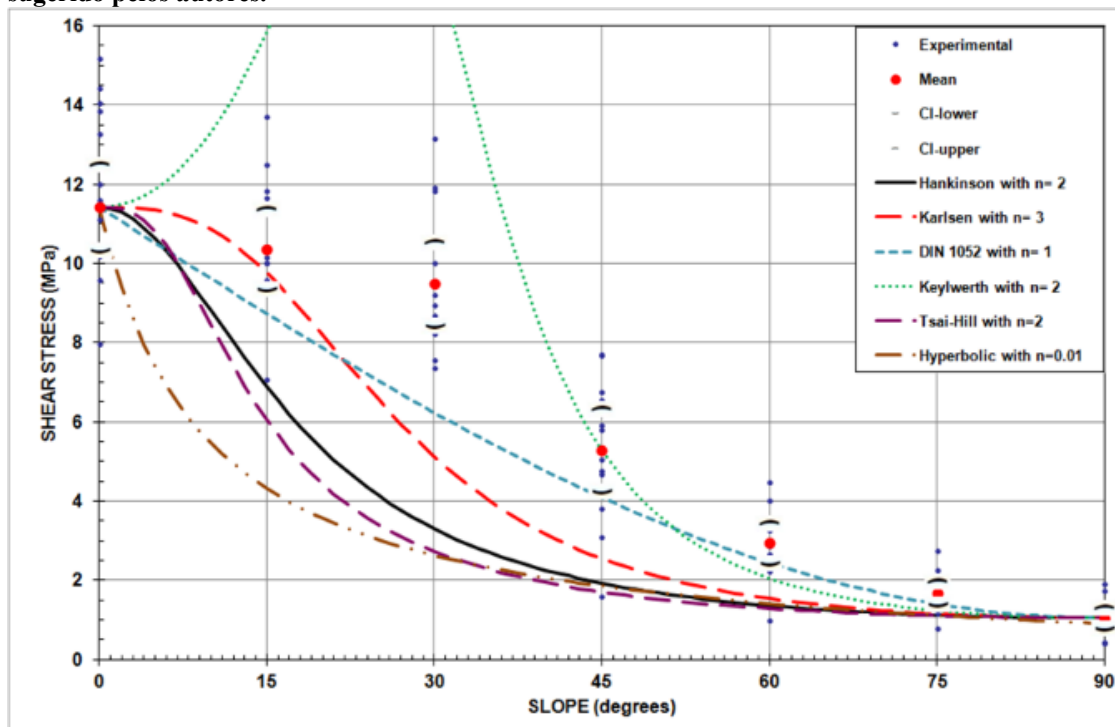
Figura 5. Tensão de cisalhamento da linha adesiva sob compressão em relação à inclinação da fibra.



Fonte: Os autores

A Figura 6 apresenta o gráfico de tensão de cisalhamento da linha adesiva sob tração em relação à inclinação da fibra, mostrando os valores experimentais (incluindo o intervalo de confiança) e as seis equações com o expoente sugerido pelos autores.

Figura 6. Apresenta o gráfico de tensão de cisalhamento da linha adesiva sob tensão em relação à inclinação da fibra, mostrando os valores experimentais (incluindo o intervalo de confiança) e as seis equações com o expoente sugerido pelos autores.



Fonte: Os autores

Assumindo que os resultados experimentais seguem uma distribuição normal, conforme mostrado pelo teste de Anderson-Darling ($p\text{-valor} > 0,05$) tanto para tensão quanto para compressão, e através da análise estatística da hipótese de diferença nula, para comparação de pares de indivíduos e grupos de indivíduos, os valores experimentais foram comparados com os equivalentes calculados pelas equações 8 a 13, utilizando a variação dos expoentes (n) das funções trigonométricas. Assim, obteve-se o valor do expoente n que fornece o melhor ajuste para cada equação. A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes de diferença nula, obtidos com a aplicação do programa Minitab 16 e sua análise.

Observando a Tabela 2, nota-se: a expressão de Hankinson (equação 5) tem validade estatística para cisalhamento sob compressão, desde que o expoente " n " esteja na faixa de $2,19 \leq n \leq 2,63$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 2,386$. Para cisalhamento sob tensão, o intervalo é de $3,97 \leq n \leq 4,79$, e o expoente que permite o melhor ajuste é $n = 4,364$. O valor tradicionalmente utilizado de $n = 2$ não tem validade estatística e apresenta alta rejeição. Os valores encontrados por [31,12] para a madeira de perobamica (*Aspidosperma populifolium*), ao analisar a influência da direção da fibra da madeira na resistência ao cisalhamento, também carecem de validade estatística ($n = 2,05$ e intervalo de $1,88 \leq n \leq 2,05$).

Tabela 2: Resultados dos testes de diferença zero entre os valores experimentais e as equações 8 a 13, variando o expoente " n " (nível de significância de 95%), com $t_{cr} = 1,992$.

Eq.	Tensão de cisalhamento	n	Diferença média	t	p	Intervalo de confiança
5	C	2.386	0.000	0.00	0.999	-0.737 ; 0.002
	T	4.346	0.000	0.00	1.000	-0.402 ; 0.402
6	C	3.113	0.000	0.00	1.000	-0.310 ; 0.310
	T	6.485	0.000	0.00	0.999	-0.284 ; 0.284
7	C	1.791	0.000	0.00	0.999	-0.275 ; 0.275
	T	1.887	-0.000	0.00	0.999	-0.249 ; 0.249
8	C	2.409	0.000	0.00	0.999	-0.246 ; 0.246
	T	3.60	-0.262	-1.16	0.250	-0.712 ; 0.188
9	C	1.528	0.000	0.00	0.999	-0.348 ; 0.348
	T	3.722	0.001	0.00	0.996	-0.454 ; 0.456
10	C	0.0043	0.000	0.00	0.998	-0.264 ; 0.264
	T	0.0018	0.000	0.00	0.999	-0.485 ; 0.484

Eq. 5 = Hankinson, 6 = Karlsen, 7 = DIN-1052, 8 = Keylwerth, 9 = Tsai-Hill, 10 = Hiperbólico. C = Compressão, T = Tensão.

Para que a expressão de Karlsen (equação 6) tenha validade estatística para cisalhamento sob compressão, o expoente " n " deve estar na faixa de $2,50 \leq n \leq 4,07$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 3,113$. Para cisalhamento sob tensão, o intervalo é de $5,60 \leq n \leq 7,63$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 6,485$. O valor tradicionalmente utilizado, recomendado por [34], de $n =$

3 tem validade estatística. No entanto, o valor encontrado por [31] é diferente, $n = 2,13$, carece de validade estatística e apresenta alta rejeição.

A expressão DIN-1052 (equação 7) terá validade estatística para cisalhamento sob compressão, desde que o expoente "n" esteja na faixa de $1,45 \leq n \leq 2,29$, e o expoente que permite o melhor ajuste seja $n = 1,791$. Para cisalhamento sob tensão, o intervalo é de $1,64 \leq n \leq 2,19$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 1,887$. O valor utilizado por esse padrão, $n = 1$, está fora do intervalo, indicando que não tem validade estatística. O valor encontrado por [31], $n = 1,21$, carece de validade estatística e mostra alta rejeição.

Para a expressão de Keylwerth (equação 8), não foi possível encontrar o limite inferior da faixa de validade estatística para o expoente da expressão, tanto para cisalhamento sob compressão quanto para tração. Parece que há uma singularidade na expressão que permite encontrar outro valor de expoente que fornece um ajuste de modelo altamente significativo. O intervalo de cisalhamento sob compressão é "valor aberto" $\leq n \leq 2,93$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 2,409$. Para cisalhamento sob tensão, o intervalo é "valor aberto" $\leq n \leq 4,79$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 3,60$. O valor tradicionalmente utilizado, $n = 2$, recomendado por [3], tem validade estatística. O valor encontrado por [31] é diferente, $n = 2,04$, com validade estatística.

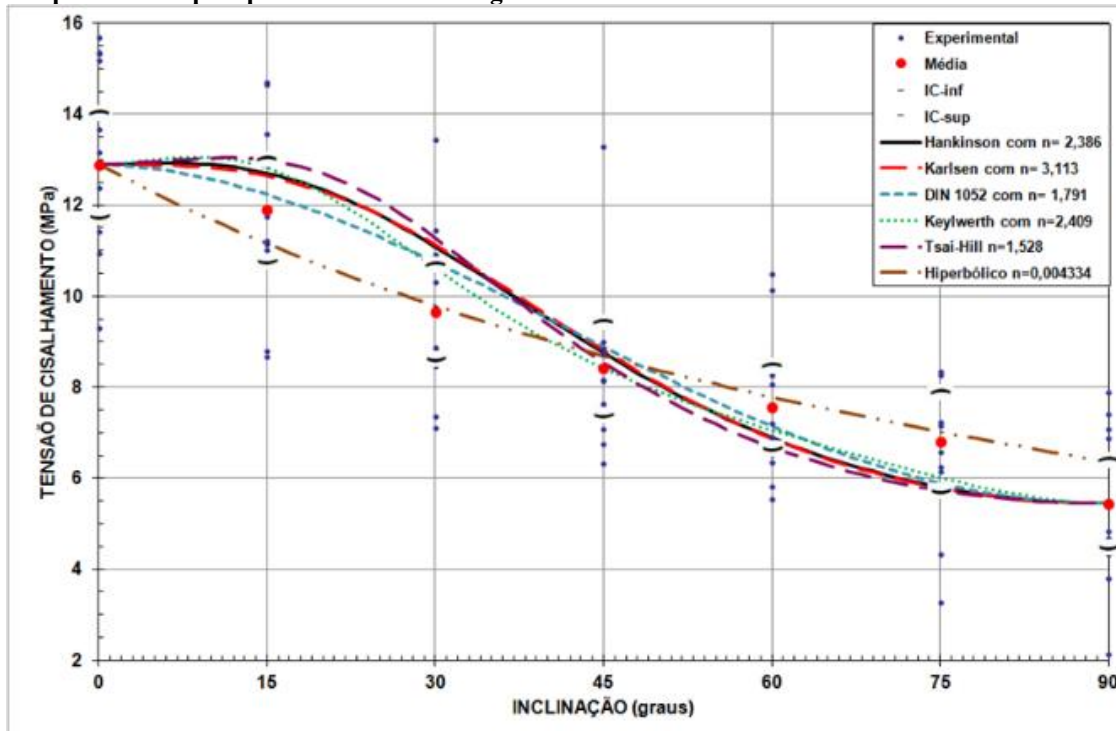
Ainda analisando a Tabela 2, observa-se que a expressão fornecida pela teoria de Tsai-Hill (equação 9) tem validade estatística para cisalhamento sob compressão, desde que o expoente "n" esteja na faixa de $1,34 \leq n \leq 1,78$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 1,528$. Para cisalhamento sob tensão, o intervalo é de $3,31 \leq n \leq 4,205$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 3,722$. O valor indicado por [24, 25], de $n = 2$, carece de validade estatística e apresenta alta rejeição.

A fórmula hiperbólica (equação 10) tem validade estatística para cisalhamento sob compressão, desde que o expoente "n" esteja na faixa de $38,7 \times 10^{-4} \leq n \leq 47,9 \times 10^{-4}$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 43,34 \times 10^{-4}$. Para cisalhamento sob tensão, o intervalo é $17,4 \times 10^{-4} \leq n \leq 28,3 \times 10^{-4}$, e o expoente que fornece o melhor ajuste é $n = 22,24 \times 10^{-4}$. O valor indicado por [24, 25], de $n = 100 \times 10^{-4}$, carece de validade estatística e apresenta alta rejeição.

Para uma avaliação mais robusta na escolha do melhor modelo que represente os resultados experimentais, foi realizada uma análise ANOVA One-way. Nesse contexto, foram utilizados os métodos de Dunnett, Tukey e Fisher. Todas as equações teóricas têm alta significância.

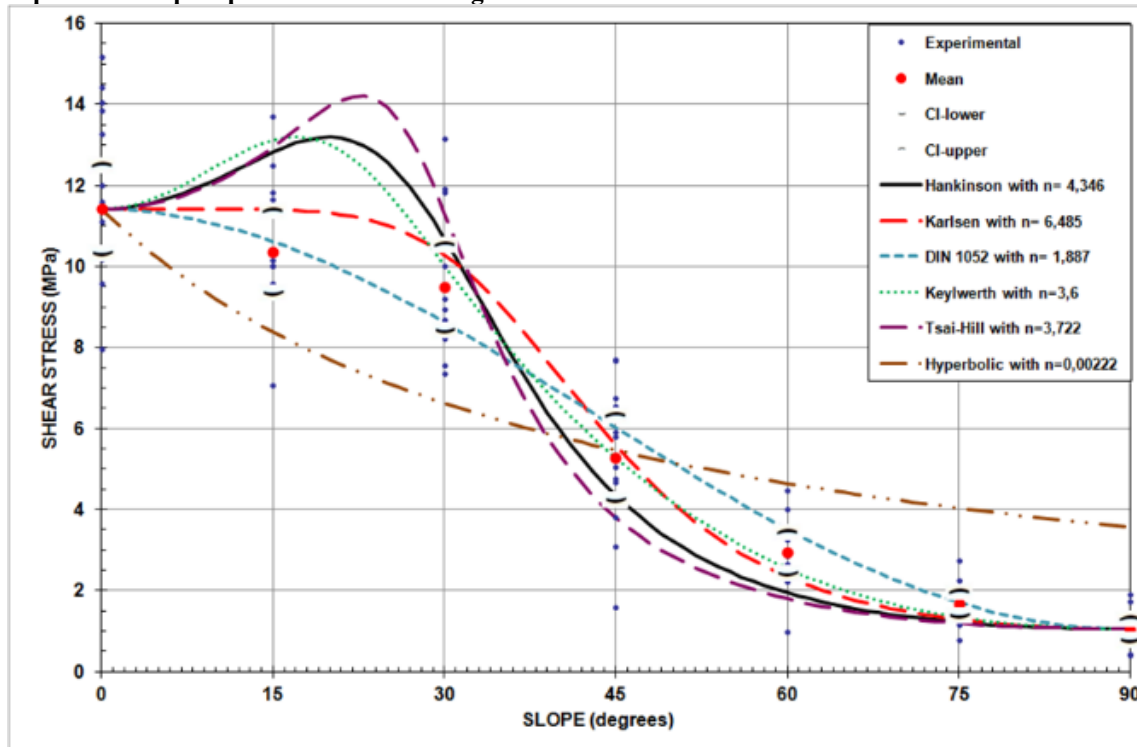
Por fim, para visualizar a variação das tensões de cisalhamento em função da inclinação das fibras, a partir de todas as equações, dentro do intervalo de confiança das tensões de cisalhamento da linha adesiva experimental sob compressão e tração (nível de significância de 95%), foi elaborada uma representação gráfica das tensões de cisalhamento dessas equações, utilizando o expoente "n" que resultou em maior significância estatística, e os valores experimentais, Figuras 7 e 8.

Figura 7. Tensão de cisalhamento da linha adesiva sob compressão em relação à inclinação da fibra. equações com o expoente "n" que apresentaram maior significância estatística.



Fonte: Os autores

Figura 8. Tensão de cisalhamento da linha adesiva sob tensão em relação à inclinação da fibra. equações com o expoente "n" que apresentaram maior significância estatística.



Fonte: Os autores

A partir da análise dos gráficos da Figura 7 (cisalhamento sob compressão) e considerando as análises estatísticas, pode-se afirmar que, em ordem de significância, as equações que melhor representam os valores experimentais de tensão de cisalhamento sob compressão são: DIN 1052 (equação 12), Keylwerth (equação 13), Hankinson (equação 14), Karlsen (equação 15), Hiperbólica (equação 16), e Tsai-Hill (equação 17).

$$f_{vac,\theta} = f_{vac,0} - (f_{vac,0} - f_{vac,90}) \times \sin(\theta)^{2,386} \quad (12)$$

$$f_{vac,\theta} = \frac{f_{v,0}}{\left(\cos(\theta)^{2,409} - \frac{f_{vac,0}}{f_{vac,90}} \times \sin(\theta)^{2,409} \right) \times \cos(2\theta) + \frac{f_{vac,0}}{f_{vac,45}} \times \sin(2\theta)^{2,409}} \quad (13)$$

$$f_{vac,\theta} = \frac{f_{vac,0} \times f_{vac,90}}{f_{vac,0} \times \sin(\theta)^{2,386} + f_{vac,90} \times \cos(\theta)^{2,386}} \quad (14)$$

$$f_{vac,\theta} = \frac{f_{vac,0}}{1 + \left(\frac{f_{vac,0}}{f_{vac,90}} + 1 \right) \times \sin(\theta)^{3,113}} \quad (15)$$

$$f_{vac,\theta} = \frac{f_{vac,0} \times f_{vac,90}}{f_{vac,0} \sinh(0,004334\theta) + f_{vac,90} \cosh(0,004334\theta)} \quad \text{ou} \quad (16)$$

$$f_{vac,\theta} = \frac{2f_{vac,0} \times f_{vac,90}}{e^{0,004334\theta} (f_{vac,0} + f_{vac,90}) + e^{-0,004334\theta} (f_{vac,90} - f_{vac,0})}$$

$$\frac{1}{f_{vac,\theta}^2} = \frac{\cos(\theta)^{3,056}}{f_{vac,0}^2} - \frac{\cos(\theta)^{1,528} \sin(\theta)^{1,528}}{f_{vac,0}^2} + \frac{\sin(\theta)^{3,056}}{f_{vac,90}^2} \quad (17)$$

Analisando os gráficos da Figura 8 (cisalhamento sob tração) e considerando as análises estatísticas, pode-se afirmar que, em ordem de significância, as equações que melhor representam os valores experimentais de tensão de cisalhamento sob tração são: DIN 1052 (equação 18) e Karlsen (equação 19).

$$f_{\text{vat},\theta} = f_{\text{vat},0} - (f_{\text{vat},0} - f_{\text{vat},90}) \times \sin(\theta)^{1,887} \quad (18)$$

$$f_{\text{vat},\theta} = \frac{f_{\text{vat},0}}{1 + \left(\frac{f_{\text{vat},0}}{f_{\text{vat},90}} + 1\right) \times \sin(\theta)^{6,485}} \quad (19)$$

Os resultados obtidos demonstram que a resistência ao cisalhamento da linha adesiva é significativamente influenciada pela inclinação das fibras de madeira. As equações ajustadas com os novos expoentes "n" fornecem um melhor ajuste aos dados experimentais, indicando que os valores tradicionalmente utilizados não são adequados para todas as situações. Os testes de compressão e tensão permitem uma compreensão mais abrangente do comportamento mecânico das madeiras estruturais e dos adesivos utilizados. A análise estatística robusta, incluindo o uso de modelos ANOVA, confirma a significância das equações ajustadas.

4 CONCLUSÕES

Em relação aos modelos de critérios de falha, nenhum dos seis modelos matemáticos avaliados (Hankinson, DIN 1052, Tsai-Hill, Hyperbolic, Keylwerth e Karlsen) apresentou significância estatística em sua forma original. Isso indica que os expoentes tradicionais usados nesses modelos não são adequados para prever com precisão a resistência ao cisalhamento da linha adesiva em função da inclinação da fibra.

Com as modificações feitas nos modelos, todas as equações apresentaram significância estatística. Os ajustes nos expoentes "n" resultaram em modelos que melhor se ajustam aos dados experimentais, fornecendo previsões mais precisas da resistência ao cisalhamento. Os modelos que apresentaram melhor ajuste, em ordem de significância, foram: DIN 1052, Keylwerth, Hankinson, Karlsen, Hyperbolic e Tsai-Hill.

Devido à facilidade de aplicação e precisão nas previsões, os modelos mais recomendados para estimar os valores de resistência ao cisalhamento da linha adesiva, tanto em compressão quanto em tração, em função da inclinação da fibra, são: DIN 1052, Hankinson e Keylwerth.

A análise de ensaios de cisalhamento em compressão e tração proporciona uma compreensão mais completa do comportamento mecânico de madeiras estruturais e adesivos poliméricos. Esses resultados são cruciais para o desenvolvimento de modelos mais precisos e confiáveis, que possam ser utilizados no projeto e construção de estruturas de madeira.

O adesivo à base de resorcinol mostrou-se eficaz na colagem de peças de madeira, apresentando resistência ao cisalhamento consistente com as previsões teóricas. A aplicação dos modelos DIN 1052 e Karlsen, após ajustes nos expoentes, proporcionou as melhores estimativas para os valores de resistência ao cisalhamento da linha adesiva sob tração e compressão.

5 CONFIRMAÇÕES

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS

- Xie, Y.; Hill, C.A.S.; Xiao, Z.; Militz, H.; Mai, C. Agentes de acoplamento de silano usados para compósitos de fibra natural / polímero: uma revisão. *Compósitos: Parte A* 2010, 41, 806–819. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>.
- Wangaard, F.F. *As Propriedades Mecânicas da Madeira*, 1ª ed.; Wiley, original da Universidade de Michigan, 1968. Digitalizado, 4 de dezembro de 2006; ISBN, 0598539182, 9780598539182.
- Kollmann, F.F.P.; Côté, W.A. *Princípios de Ciência e Tecnologia da Madeira: I. Madeira Maciça*, Springer, Berlim, Alemanha, 1984. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>
- Dinwoodie, J.M. Timber: Uma revisão da relação estrutura-propriedade mecânica. *Jornal de Microscopia* 1975, 104, 1, 3-32. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2818.1975.tb04002.x>.
- Bodig, J.; Jayne, B. A. *Mecânica da madeira e compósitos de madeira*. 2ª ed.; Krieger: Malabar, FL, EUA, 1993.
- Oliveira, M.; Surini, T. Resistência ao cisalhamento e resistência à tração perpendicular ao grão de madeira de pinho silvestre sem defeitos de povoamentos maduros na Finlândia e na Suécia. *Ciência e Tecnologia da Madeira* 2008, 42, 75-91. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-007-0151-8>.
- Franke, S.; Quenneville, P. Comportamento de compressão e parâmetros de material do pinheiro radiata em diferentes orientações para o grão. *Jornal de Materiais em Engenharia Civil* 2013, 25, 1514-1523. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000699](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000699).
- Follrich, J.; Oliveira, A.; Gindi, W.; Müller, U. Efeito do ângulo do grão na resistência ao cisalhamento do grão final colado em juntas de grão plano de madeira macia sem defeitos *Ciência e Tecnologia da Madeira* 2007, 41, 501-509. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-007-0136-7>.
- Oliveira, E.; Kiliç, G.; Elibol, C.; Kiliç, M. A resistência ao cisalhamento do pinheiro da Calábria (*Pinus brutia* Ten.) Colado com adesivos de poliuretano e acetato de polivinila. *Jornal de Ciência de Polímeros Aplicada* 2006, 99, 3050-3061. <http://dx.doi.org/10.1002/app.22905>.
- Carvalho, E.V.M.; Mantilla, J.N.R. Aplicação de critérios de ruptura na avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas aderentes de acordo com a inclinação dos grãos sob carga compressiva. *Revista Internacional de Engenharia e Tecnologia* 2013, 13, 4, 19-25.
- Chen, X.D.; Cheng, Y.Y.; Chan, A.N.; Oliveira, D.; Nolan, G. Caracterização de tração anisotrópica de madeira de *Eucalyptus nitens* acima de seu ponto de saturação de fibras e sua aplicação. *Polímeros* 2022, 14, 12, e2390. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14122390>.
- Padilha, V.H.L.; Oliveira, A.; dos Santos, A.; Possa, D.C.; Oliveira, S.M.F.C.; Savaris, G. Resistência ao cisalhamento de juntas coladas de madeira de pinus com diferentes ângulos obtidas usando métodos de ensaio de compressão e torção. *Revista Árvore* 2023, 47, e4727. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-908820230000027>
- Blyberg, L.; Oliveira, E.; Enquist, B.; e Sterley, M. Juntas adesivas para aplicações estruturais de madeira / vidro: Métodos experimentais de teste e avaliação. *Revista Internacional de Adesão e Adesivos* 2012, 35, 76-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.02.008>.

Follrich, J.; Vay, O.; Oliveira, S.; Müller, U. Resistência de união de juntas de grão final e sua dependência da rugosidade da superfície e propagação adesiva. *Jornal de Ciência da Madeira* 2010, 56, 429-434. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-010-1118-1>.

Patel, A.K.; Michaud, P.; Petit, E.; Baynast, H.; Grédiac, M. Desenvolvimento de um adesivo à base de quitosana. Aplicação à colagem de madeira. *Ciência Aplicada de Polímeros* 2013, 127, 5014-5021. <http://dx.doi.org/10.1002/app.38097>.

Serrano, E. Um estudo numérico das capacidades de previsão da resistência ao cisalhamento de corpos de prova para ligações adesivas de madeira. *Jornal Internacional de Adesão e Adesivos* 2004, 24, 23-35. [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-7496\(03\)00096-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-7496(03)00096-4).

Tannert, T.; Vallée, T.; Hehl, S. Investigações experimentais e numéricas em juntas de madeira adesivas. *Ciência e Tecnologia da Madeira* 2012, 46, 579-590. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-011-0423-1>.

Raftery, G.M.; Harte, A.M.; Rodd, P.D. Colagem de materiais FRP à madeira usando cola epóxi fina. *Revista Internacional de Adesão e Adesivos* 2009, 29, 580-588. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2009.01.004>.

Vallée, T.; Tannert, T.; Hehl, S. Investigações experimentais e numéricas em treliças de madeira adesivas em escala real. *Materiais e Estruturas* 2011, 44, 1745-1758. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-011-9735-8>.

Carvalho, E.V.M.; Mantilla, J.N.R. Critérios de ruptura para avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas coladas de acordo com a inclinação do grão sob carga de tração. *Biorrecursos* 2015, 10, 2, 1845-1855. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.10.2.3602-3614>.

Wang, T.; Wang, Y.; Oliveira, M.; Oliveira, R.; Wålinder, M.; Blomqvist, L. Força de ligação entre madeira laminada de abeto e compensado de bétula em diferentes ângulos de grão de face de carga para madeira compensada. *Revista Europeia de Madeira e Produtos de Madeira* 2024. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02097-9>.

Budhe, S.; Banea, M.D.; de Barros, S.; da Silva, L.F.M. Uma revisão atualizada de juntas adesivas em materiais compósitos. *Revista Internacional de Adesão e Adesivos* 2017, 72, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010>.

Oliveira, A.; Mautner, A.; Pramreiter, M.; Bismarck, A.; Müller, U. Adesão interfacial e propriedades mecânicas de compósitos híbridos madeira-polímero preparados por moldagem por injeção. *Polímeros* 2021, 13, 2849. <https://doi.org/10.3390/polym13172849>.

Woodward, C.; Minor, J. Teorias de falha para Douglas-fir em tensão. *Jornal de Engenharia Estrutural* 1988, 114, 2808-2813. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:12\(2808\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:12(2808))

Oh, S.C. Aplicação de critérios de falha à avaliação da resistência de lâminas laminadas de 3 camadas de acordo com a direção do grão por ensaio de tensão uniaxial. *Construção e Materiais de Construção* 2011, 25, 1480-1484. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.002>.

Frohn Müller, J.; Seim, W. Resistência de aderência, critérios de falha e métodos de cálculo para compósitos de madeira-concreto adesivos. *Construção e Materiais de Construção* 2024, 423, 135651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135651>.

Liu, J. Y. Novo teste de resistência ao cisalhamento para madeira maciça. *Ciência da Fibra de Madeira* 1984, 16, 4, 567-574.

Liu, J.Y. Critérios de resistência para materiais ortotrópicos. Em *Anais da 8ª Conferência Internacional Anual sobre Engenharia de Compósitos*, Espanha, 358-398 de maio de 2001.

Laboratório de Produtos Florestais. Manual da madeira: madeira como material de engenharia. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Laboratório de Produtos Florestais, Madison, WI, EUA, 1999. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-113>

Liu, J.Y.; Ross, R. J. Variação da propriedade da madeira com inclinação de grãos. Em *Anais da 12ª Conferência de Engenharia Mecânica*, La Jolla, CA, EUA, 17-20. Junho de 1998.

Logsdon, N.B.; Dedo, Z.; Jesus, J.M.H. Influência do ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras da madeira sobre a resistência ao cisalhamento. *Ciência Florestal* 2014, 24, 4, 969-978. <https://doi.org/10.1590/1980-509820142404016>.

Szücs, C.A. Estudo do comportamento da madeira a esforços inclinados. In *4º Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira*, São Carlos, SP, Brasil, 2, 53-60. Junho de 1992.

Carvalho, E.V.M.; Mantilla, J.N.R. Influência da inclinação das fibras da madeira na sua resistência ao cisalhamento. *Ciência Florestal* 2016, 26, 535-543. <https://doi.org/10.5902/1980509822754>.

Karlsen, G.G.; Bolshakov, V.V.; Kagan, M.Y.; Svetsitsky, G.V.; Aleksandrovsky, K.V.; Oliveira, I.V.; Folomin, A. I. *Estruturas de madeira*, Mir Publishers, Moscou, Rússia, 1967.

DIN 1052; Dimensionamento de estruturas de madeira - Regras gerais e regras para edifícios. Deutsches Institut für Normung: Berlim, Alemanha, 2008.

Woodward, C. As propriedades elásticas e de resistência do abeto de Douglas no plano radial-longitudinal. Ph.D. dissertação, Universidade Estadual do Novo México, Las Cruces, NM, EUA, 1986.

Carrasco, E.V.M. Ligações estruturais de madeira por adesivos, tese de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 1984.

Gesso, O.B.; Oliveira, J.T.S.; Gonçalves, F.G.; Motta, J.P. Comportamento de adesão da madeira de um híbrido clonal de *eucalyptus urophylla* x *eucalyptus grandis* proveniente de três condições de manejo. *Ciência Florestal* 2012, 22, 2, 323-330. <https://doi.org/10.5902/198050985739>.

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. ABNT: Rio de Janeiro, Brasil, 2022.

ASTM D-143-94; Métodos normalizados de ensaio de pequenos espécimes transparentes de madeira. ASTM: Filadélfia, PA, EUA, 2007.

Hellmeister, J.C. Sobre a determinação das características físicas da madeira. Dissertação de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1973.