

VICTOR HUGO LAZZERETTI PADILHA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO À
COMPRESSÃO E À TORÇÃO DE JUNTAS COLADAS DE PINUS
CONFECCIONADAS COM DIFERENTES ÂNGULOS E UNIDAS COM
ADESIVO POLIURETANO**

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
MARÇO - 2023

VICTOR HUGO LAZZERETTI PADILHA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO À
COMPRESSÃO E À TORÇÃO DE JUNTAS COLADAS DE PINUS
CONFECCIONADAS COM DIFERENTES ÂNGULOS E UNIDAS COM
ADESIVO POLIURETANO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof.^o Dr. Alfredo Petruski

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
MARÇO – 2023

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Padilha, Victor Hugo Lazzaretti

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO À COMPRESSÃO E À TORÇÃO DE JUNTAS COLADAS DE PINUS CONFECCIONADAS COM DIFERENTES ÂNGULOS E UNIDAS COM ADESIVO POLIURETANO / Victor Hugo Lazzaretti Padilha; orientador Alfredo Petruski. - Cascavel, 2023. 43 p.

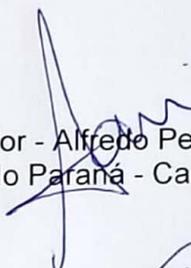
Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2023.

1. Juntas coladas. I. Petruski, Alfredo, orient. II. Título.

VICTOR HUGO LAZZARETTI PADILHA

Avaliação da Resistência ao cisalhamento à compressão e à torção de juntas coladas de pinus confeccionadas com diferentes ângulos e unidas com adesivo poliuretano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



Orientador - Alfredo Petruski

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



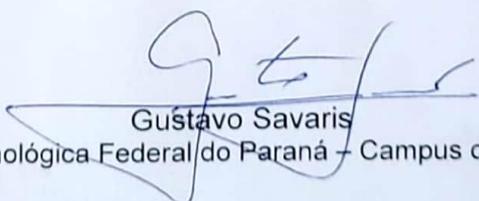
Sandra Maria Ferreira Coum Petruski

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Alessandra dos Santos

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Gustavo Savaris

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Toledo (UTFPR)

Cascavel, 13 de março de 2023

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais atividades econômicas que demandam os produtos da indústria de produtos de madeira	5
Figura 2 – Detalhe da ligação colada (A), e pórtico triarticulado reto (B).	8
Figura 3 – Conformação do lote da pesquisa.....	16
Figura 4 – Tábuas desengrossadas	16
Figura 5 – Desempenadeira (a), serra circular (b) e plaina desengrossadeira (c).....	17
Figura 6 – Prensa manual	18
Figura 7 – Torquímetro eletrônico	18
Figura 8 – Colagem em ângulo com contenções laterais.....	19
Figura 9 – Modelo de colagem e extração de corpos de prova.....	20
Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento a compressão da junta colada, dimensões em mm.....	21
Figura 11 – Aparato para cisalhamento na compressão.	21
Figura 12 – Corpo de prova para ensaio da resistência ao cisalhamento na torção.	22
Figura 13 – Ensaio de cisalhamento na torção com o aparato na Máquina Universal de Ensaio.....	22
Figura 14 - Exemplo de curvas do modelo de Hankinson assumindo $f_{w0j} = 100$, $f_{w90j} = 40$ e variando b_j em 1,5; 2 e 2,5.	25
Figura 15 – Conformação dos conjuntos em prensa manual.	28
Figura 16 – Fissuração fora do plano colado em corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento à torção, corpo de prova do grupo G1 e ângulo de 0°	29
Figura 17 – Fissuração fora do plano colado em corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento à compressão. Corpo referente ao grupo G2 e ângulo de 10°	30
Figura 18 - Gráficos referentes a tendência da resistência conforme material/grupo de densidade da madeira e ensaio (C ou T) nos diferentes ângulos de colagem.	31
Figura 19 - Gráficos boxplot referentes a resistência conforme ângulo de colagem e ensaio (C ou T).....	32
Figura 20 - Gráfico referente a resistência amostral (pontos menores) e resistência média (pontos maiores), de acordo com o ângulo de colagem e o ensaio realizado.	35

Figura 21 - Gráfico referente ao ajuste do modelo de Hankinson de acordo com o ensaio. Os pontos menores são os valores da resistência amostral e os maiores são a resistência média.36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informações de variáveis nos dias de colagem	27
Tabela 2: Resistências médias ao cisalhamento, incluso desvio padrão, por ensaio e ângulos de colagem.	31
Tabela 3: Resumo da ANOVA para os resultados experimentais.	33
Tabela 4: Resumo da ANOVA dado o desdobramento do fator ângulo dentro de ensaio.....	33
Tabela 5: Média e resultado do teste Tukey de comparações múltiplas dado o fator ângulo dentro do fator ensaio C e ensaio T, independentemente.	34
Tabela 6: Resumo da ANOVA dado o desdobramento do fator ensaio dentro de ângulo.	34
Tabela 7: Coeficientes estimados no modelo de Hankinson e seus respectivos intervalos de confiança e coeficiente de determinação.	37

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação modelo para dimensionamento de ligações coladas.....	8
Equação 2: Equação modelo composta para dimensionamento de ligações coladas	8
Equação 3: Tensão máxima ao cisalhamento na torção de juntas coladas (Pa)	22
Equação 4: Modelo estatístico para a resistência em 12% de umidade.	23
Equação 5: Modelo de Hankinson.....	24
Equação 6: Coeficiente de determinação R^2	26

PADILHA, Victor Hugo Lazzaretti; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2023. **Avaliação da resistência ao cisalhamento à compressão e à torção de juntas coladas de pinus confeccionadas com diferentes ângulos e unidas com adesivo poliuretano.** Professor orientador Dr. Alfredo Petruski.

RESUMO

A Madeira Lamelada Colada é uma tecnologia que visa a formação de peças estruturais em madeira unidas com adesivo. No contexto do emprego estrutural ser permanente ou de longa duração, com o uso dessa tecnologia é possível mitigar as emissões de carbono para a atmosfera, gerando o aprisionamento do carbono nas estruturas executadas. Pode-se destacar, também, os benefícios ambientais associados ao uso de madeiras de reflorestamento. Com ênfase ao emprego estrutural da madeira, o presente trabalho avaliou a qualidade da adesão de juntas coladas com diferentes ângulos entre as fibras da madeira, confeccionadas com a madeira de *Pinus sp.* e unidas com o adesivo poliuretano bicomponente a base de óleos vegetais. As juntas coladas foram confeccionadas com a formação dos ângulos de 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° e 90° e avaliadas em ruptura por esforço de cisalhamento à compressão e cisalhamento à torção. Quando submetidos à análise de regressão, os valores obtidos para as resistências ao cisalhamento na compressão apresentaram curva compatível com a fórmula de Hankinson, apresentando valor de R^2 próximo a 0,76; porém os resultados para o cisalhamento à torção apresentaram valores de R^2 próximos a 0,17. Dessa maneira, a fórmula de Hankinson não se mostrou adequada como estimadora da resistência para o cisalhamento sob torção. Os corpos de prova apresentaram resposta mecânica diferente ao cisalhamento quando ensaiados à compressão comparativamente aos ensaiados à torção.

PALAVRAS-CHAVE: adesão, madeira, colagem em ângulos.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”

PADILHA, Victor Hugo Lazzaretti; State University of West Paraná, March 2023.
Evaluation of shear strength to compression and torsion of glued pine joints made at different angles and joined with polyurethane adhesive. Advisor Professor Dr. Alfredo Petrauski.

ABSTRACT

Glued Laminated Wood is a technology based on the formation of structural pieces of wood joined together with adhesive. In the context of permanent or long-term structural use, applying this technology makes it possible to mitigate carbon emissions into the atmosphere, generating carbon trapping in the executed structures. The environmental benefits associated with the use of reforestation wood can be highlighted as well. With emphasis on the structural use of wood, the present work evaluated the adhesion quality of glued joints with different angles between the wood fibers, which were manufactured with *Pinus* sp. wood and joined with a bicomponent polyurethane vegetable-oil-based adhesive. The glued joints were produced with angles of 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° and 90° and evaluated in shear stress failure by compression and shear by torsion. When submitted to regression analysis, the values obtained for shear strength in compression showed a curve compatible with Hankinson's formula, with an R^2 value close to 0.76; however, the results for torsional shear showed R^2 values close to 0.17. Thus, Hankinson's formula turned out inadequate as an estimator of shear strength under torsion. The specimens showed different mechanical response to shear when tested in compression compared to those tested in torsion.

KEYWORDS: adhesion, wood, bonding at angles.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo geral	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 PRODUÇÃO FLORESTAL E MADEIREIRA NO BRASIL	4
2.2 MADEIRA LAMELADA COLADA	5
2.3 TEORIA DA ADESÃO	10
2.4 PROCESSO DE COLAGEM	11
2.4 ADESIVOS POLIURETANOS	12
3 MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 GENERALIDADES.....	15
3.2 PARÂMETROS DE COLAGEM COM O ADESIVO POLIURETANO.....	17
3.3 EXPERIMENTAÇÃO COM DIFERENTES ÂNGULOS DE COLAGEM.....	19
3.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS OBTIDAS PELA COMPRESSÃO E TORÇÃO.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 PROCESSAMENTO DA MADEIRA	27
4.2 ENSAIO EM MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS.....	29
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	30
5 CONCLUSÕES	39
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

A madeira de reflorestamento é um material renovável com benefícios sociais e ambientais. Seu ciclo de carbono é próximo à zero, observando que todo o carbono constituinte da madeira foi anteriormente retirado da atmosfera pelo ciclo biológico do vegetal (BARATA *et al.*, 2020). Tendo em vista o emprego permanente, os benefícios ambientais são majorados com a formação de “reservas de carbono”, no qual o carbono retirado da atmosfera ficará por longos períodos estocado dentro da composição química da madeira (SILVA *et al.*, 2015; SUSAETA *et al.*, 2017). Devido ao material ser oriundo de florestas plantadas, sua produção prevê ciclo sustentável, caracterizando sua utilização como material renovável (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2014).

Quando comparado ambientalmente pelo sistema de avaliação de ciclo de vida, a madeira possui gasto energético e passivo ambiental inferior a outros materiais utilizados na construção civil, como o aço e o concreto (DEMARZO; PORTO, 2007). Dessa maneira, o emprego da madeira na construção civil se torna um importante tema de discussão para redução das emissões de carbono e sustentabilidade dos sistemas construtivos, podendo ser empregado de forma permanente na formação de sistemas estruturais.

Contudo, a aplicação de sistemas estruturais em madeira, de forma competitiva no mercado, parece exigir a utilização de técnicas construtivas que permitam a industrialização das estruturas em madeira. Com o uso de processos industriais em construções, é possível aumentar a confiabilidade e minimizar o desperdício do material, empregando controles rígidos de qualidade e acelerando os processos construtivos (TAM *et al.*, 2007).

Uma das técnicas construtivas que exige a confecção industrial é a Madeira Lamelada Colada (MLC). Esta técnica consiste na união de lâminas de madeira com a utilização de adesivos, objetivando a formação de peças de seção superior quando comparado as lâminas de origem (CARRASCO, BREMER e MANTILLA, 2020).

A união de peças de madeira por meio de adesivos é prática vantajosa para superar, por exemplo, a limitação dimensional das peças de madeira, gerando juntas coladas com rigidez superior quando comparadas ao emprego de ligações pregadas ou parafusadas (PFEIL e PFEIL, 2003).

Para emprego estrutural, as ligações coladas devem propiciar resistências semelhantes a madeira sólida, possibilitando a transferência das tensões atuantes entre as lâminas coladas, garantindo o desempenho satisfatório da ligação estrutural (SEGUNDINHO *et al.*, 2021).

Observando as diferentes tensões atuantes, as ligações coladas são analisadas segundo tensões cisalhantes no plano colado. As ligações estruturais podem estar sujeitas tanto a tensões de cisalhamento por carga normal, quanto a tensões de cisalhamento por esforço de torção. Os dois tipos de tensão cisalhantes podem atuar ao mesmo tempo sobre a ligação, sendo ambos relevantes para dimensionamento de ligações estruturais (PETRAUSKI *et al.*, 2020; STRINGARI *et al.*, 2020; POSSA *et al.*, 2022).

Devido a complexidade da distribuição de tensões sobre a superfície colada, assim como a característica anisotrópica da madeira, a resistência da junta colada apresenta valores de tensões de ruptura diferentes conforme variação da orientação das fibras nas lâminas coladas. Desse modo, é necessário avaliar a resistência ao cisalhamento da junta para diferentes ângulos de colagem, com o intuito de dimensionamento da ligação colada.

No contexto do desempenho de juntas coladas, ainda, a resistência média de ruptura da junta colada ensaiada ao cisalhamento na compressão apresenta valores diferentes dos valores de resistência ao cisalhamento sob torção (COURI PETRAUSKI, *et al.*, 2022).

Dessa maneira, o presente trabalho avaliou a resistência de juntas coladas com diferentes ângulos entre as fibras da madeira, confeccionadas com madeira de *Pinus sp.* e o adesivo poliuretano bicomponente a base de óleos vegetais e submetidas à ruptura ao cisalhamento por compressão ou torção.

Os valores de ruptura por cisalhamento à compressão foram confrontados com os valores de ruptura por cisalhamento à torção, avaliando eventuais diferenças entre as resistências para cada tipo de ensaio.

Alguns autores, também, pesquisam a utilização da fórmula de *Hankinson* como estimadora da resistência de juntas coladas com diferentes ângulos entre as fibras da madeira e essas pesquisas apresentam resultados promissores para o cisalhamento à compressão (COURI PETRAUSKI, *et al.*, 2022; DE PAULA, 1983). De modo semelhante, as resistências médias obtidas no programa experimental aqui conduzido foram confrontadas com as estimadas pela fórmula de *Hankinson*,

verificando a sua utilização como forma de estimar a resistência da junta em ensaio de compressão e ensaio de torção.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a resistência ao cisalhamento à compressão comparativamente a resistência ao cisalhamento à torção de juntas de *Pinus sp.* coladas com adesivo poliuretano, realizando a colagem com nove ângulos distintos.

1.1.2 Objetivos específicos

Compreenderam objetivos específicos:

- Avaliar a variabilidade da densidade do lote adquirido de *Pinus sp.* e separar o lote em grupos, conforme resultados, objetivando controle experimental;
- Confeccionar juntas de *Pinus sp.* coladas com o adesivo poliuretano bicomponente à base de óleos vegetais sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira, compreendendo a série: 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° e 90°;
- Extrair das juntas coladas corpos de prova para ensaio ao cisalhamento na compressão e ao cisalhamento sob torção;
- Avaliar a fórmula de *Hankinson* como estimadora da resistência ao cisalhamento na compressão e na torção de juntas coladas sob diferentes ângulos;
- Comparar a resistência ao cisalhamento na compressão com a resistência ao cisalhamento sob torção das juntas coladas;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO FLORESTAL E MADEIREIRA NO BRASIL

A indústria brasileira de árvores plantadas (IBÁ, 2022) atesta que o setor respondeu, em média, por 1,0% da economia nacional entre 2010 e 2020. Atualmente isso ocorre num cenário em que as florestas plantadas ocupam pouco mais de 1% do território brasileiro. Na cadeia produtiva vinculada à produção florestal, destaca-se no Brasil a produção de celulose. Segundo os dados apresentados pelo órgão, o Brasil foi o maior exportador de celulose no mundo em 2021, tendo exportado um valor equivalente a US\$ 1,2 bilhão a mais que o segundo colocado, o Canadá. Adicionalmente, o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal no mundo, sendo que sua produção está associada à indústria siderúrgica nacional (IBÁ, 2022).

Os principais cultivos em florestas plantadas no Brasil são a produção de pinus e eucalipto, sendo o país referência mundial em produtividade. No ano de 2019, atingiram-se os índices de 38,6 m³/ha e 31,9 m³/ha em produtividade de eucalipto e pinus, respectivamente. O Paraná é o estado responsável pela produção de 43% da madeira de pinus do território nacional (IBÁ,2022).

No Brasil em 2020, mais de 94 % da madeira serrada produzida foi absorvida pelo mercado interno. Quanto à destinação da madeira em ambiente nacional, a Figura 1 resume a realidade do ano de 2020 em relação à indústria de produtos da madeira (IBÁ, 2022).

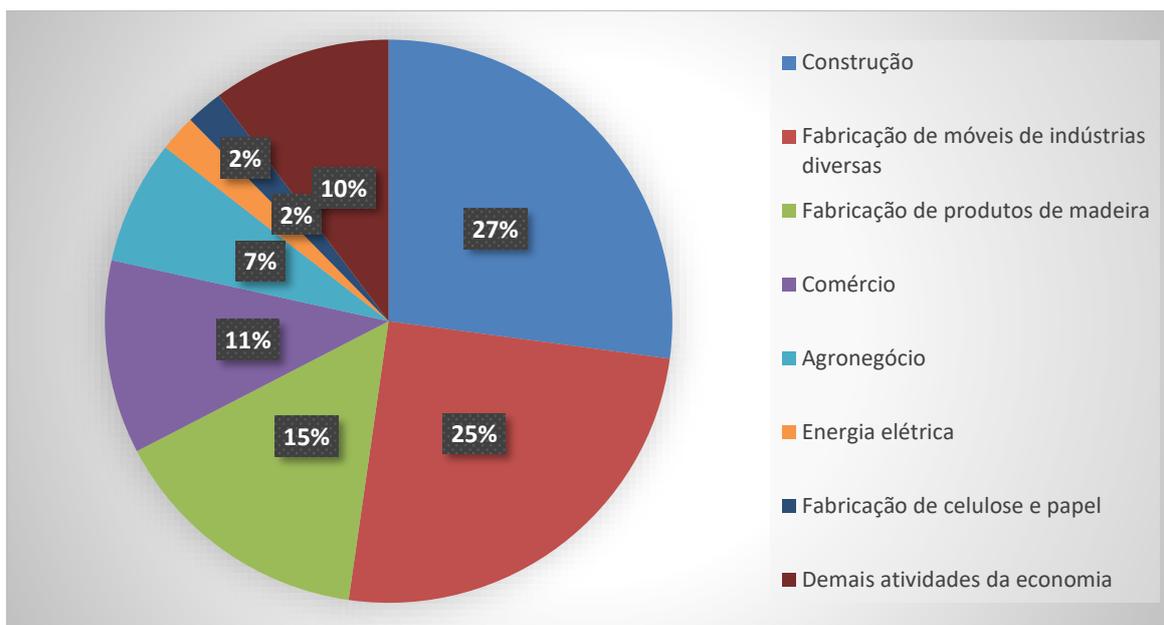


Figura 1 - Principais atividades econômicas que demandam os produtos da indústria de produtos de madeira

Fonte: IBÁ, 2022 (adaptado).

Conforme ilustra a Figura 1, dentre a madeira industrializada, 27% são destinadas à construção civil. Isso envolve o desdobramento de madeira, estruturas de madeira e produtos de carpintaria para construção (IBÁ, 2022).

Frente aos elevados índices de produção florestal brasileira e sua capacidade industrial, a madeira tem elevado potencial de uso para construção, ainda pouco explorado em suas possibilidades de aplicação (LOPES, 2019). Tal perspectiva relaciona-se, principalmente, em sistemas de aplicação permanente, como soluções estruturais em madeira, sistemas de vedação e sistemas para coberturas.

2.2 MADEIRA LAMELADA COLADA

A madeira de florestas plantadas, utilizada segundo técnicas industriais, poderia ganhar em competitividade frente a materiais tais como o aço e o concreto. Algumas técnicas industriais permitem a execução de elementos estruturais e de estruturas para diferentes empregos tais como: estruturas de cobertura, vigas e pórticos. A Madeira Lamelada Colada – MLC - é uma destas técnicas que impõe

elevado controle de qualidade, além de permitir a produção de elementos estruturais de grande porte com madeira de reflorestamento (PFEIL e PFEIL, 2003).

A Madeira Lamelada Colada compreende peças de madeira reconstituídas a partir de lâminas de madeira de dimensões reduzidas quando comparadas às dimensões da peça final executada. Essas lâminas são unidas por processo de colagem de maneira que suas fibras ficam paralelas entre si (SZUCS *et al.*, 2015). A NBR 7190 (ABNT, 2022) também só admite a colagem de madeira com as peças dispostas de modo paralelo em relação à direção das fibras. Contudo, a resistência de juntas coladas a diferentes ângulos pode ser estimada, por exemplo, pela fórmula de *Hankinson* (DE PAULA, 1983).

Couri Petruski (1999) executou e testou 4 unidades de pórticos treliçados feitos em MLC com madeiras de *Eucalipto Citriodora* e *Eucaliptus Grandis* e adesivo resorcinol formaldeído. No ano seguinte, Petruski (2000) construiu e submeteu a testes de carga seis unidades de treliças fink, feitas lameladas coladas com madeira de *Eucaliptus Grandis* e o mesmo adesivo. Os autores atestaram que os resultados das pesquisas foram plenamente satisfatórios do ponto de vista da resistência e rigidez e evidenciaram a possibilidade de realizar-se ligações a diferentes ângulos, utilizando exclusivamente adesivos. Outra contribuição dos pesquisadores foi a idealização de uma fórmula para realizar-se o dimensionamento de ligações coladas, cuja forma atual está apresentada nas equações 1 e 2. Contudo, conforme relatado por Couri Petruski *et al.* (2022), sistemas treliçados trabalham fundamentalmente a esforços normais (tração ou compressão) com pequena incidência de momentos fletores e esforços cortantes.

Posteriormente, Couri Petruski *et al.* (2016), tendo executado e testado cinco pórticos em MLC de *Eucalipto sp.*, confirmaram o bom desempenho estrutural das unidades sob carga, nas quais três estruturas executadas com resorcinol formaldeído apresentaram quociente médio entre as cargas de ruptura e a carga de projeto no valor de 4,63. Ainda, as outras duas estruturas executadas com adesivo a base de óleos vegetais apresentaram quociente médio entre as cargas de ruptura e carga de projeto de 4,42. Tais resultados indicaram desempenho satisfatório e, ainda, estão associados a estruturas que trabalham fundamentalmente à flexão (momento fletor).

Stringari (2019) e Filippini (2020) também construíram e testaram pórticos triarticulados em MLC com madeira de araucária e, nesse caso, executaram unidades em escala reduzida adequada ao uso em instalações para aviários de postura.

Visando maior economia trabalhou-se, nas duas pesquisas, com variação da inércia das barras de cobertura. O adesivo usado foi o bicomponente à base de óleos vegetais. Na primeira pesquisa, foram testadas 5 unidades que indicaram, em média, cargas de ruptura 4,14 vezes maiores que a carga de projeto. Na segunda pesquisa, Filippini (2020) utilizou a mesma geometria das estruturas de Stringari (2019) tendo, contudo, adicionado um reforço na região da ligação principal do pórtico. Esse reforço equivaleu a um consumo adicional de madeira e adesivo da ordem de 3%. Contudo, considerando as cinco unidades executadas e testadas, Filippini (2020) obteve 32% a mais de resistência com o uso do reforço. Essas pesquisas com pórticos são importantes no sentido de confirmar o bom desempenho de juntas coladas quando o esforço predominante na ligação é o momento fletor.

O esquema geral dos pórticos triarticulados executados e testados nas pesquisas citadas é apresentado na Figura 2. Nesta Figura, à esquerda, apresenta-se um detalhe da ligação principal dessas estruturas. Nesse detalhe estão representados os esforços aos quais a ligação colada fica sujeita: momento fletor (M); força normal (N) e força cortante (V). Nesse contexto, Petruski *et al.* (2020) evidenciaram que quando uma junta colada é rompida por cisalhamento sob compressão, sua resistência é significativamente afetada pelo ângulo de colagem entre as fibras da madeira e, pode-se estimar a resistência utilizando-se a fórmula de *Hankinson*. Complementarmente, os autores atestam que quando a junta colada é rompida por momento de torção (ou momento fletor na barra - M) sua resistência é pouco sensível ao ângulo de colagem e, ainda, difere da resistência de juntas coladas sujeitas a esforços normais. Como consequência, os pesquisadores propuseram um novo método de ensaio, nesse caso, para avaliação da resistência de juntas coladas sob torção.

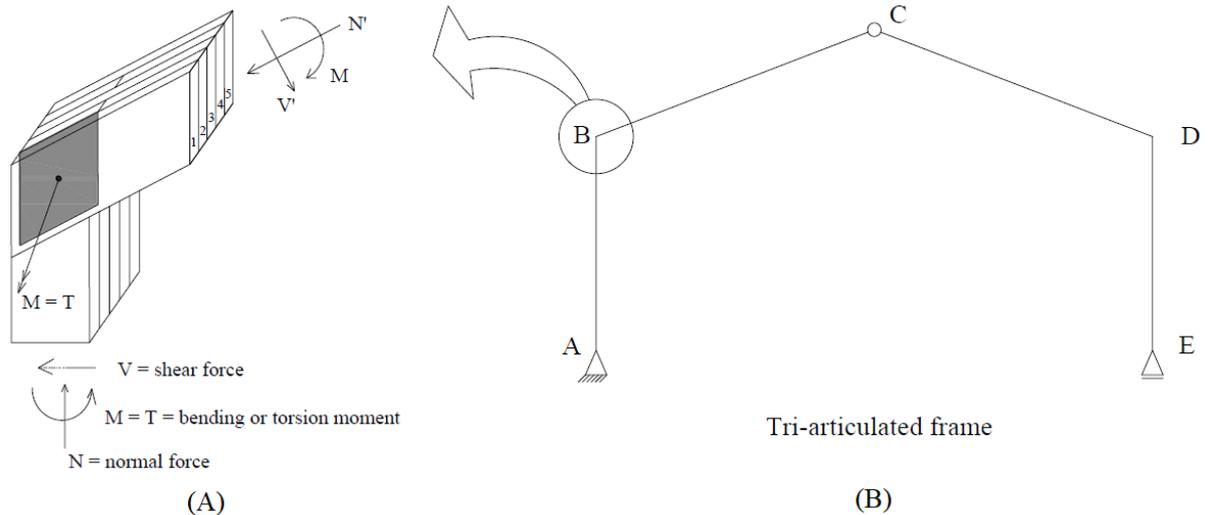


Figura 2 – Detalhe da ligação colada (A), e pórtico triarticulado reto (B).

Fonte: Petrauski et al., 2020 (adaptado).

Em razão dos resultados obtidos, a fórmula originalmente proposta por Couri Petrauski (1999) e Petrauski (2000) para verificação e dimensionamento de ligações coladas é atualmente usada, na forma indicada nas equações 1 e 2.

$$A_M + A_N + A_V \leq A_d \quad (1)$$

Onde:

A_M = área colada necessária para absorção do momento fletor atuante (M_d), cm^2 ;

A_N = área colada necessária para absorção da força normal atuante (N_d), cm^2 ;

A_V = área colada necessária para absorção da força cortante atuante (V_d), cm^2 ;

A_d = área disponível para colagem na ligação em análise, cm^2 ;

A equação 1 é genérica e, face aos estudos realizados, os autores propõem seu uso na forma da equação 2.

$$\left(\frac{2 \cdot M_{td} \cdot \pi^{1/2}}{n \cdot f_{tor90,d}} \right)^{2/3} + \frac{N_d}{n \cdot f_{v\alpha,d}} + \frac{V_d}{n \cdot f_{v90,d}} \leq \frac{h_1 \cdot h_2}{\text{sen}(\alpha)} \quad (2)$$

Onde:

M_{td} = momento fletor atuante na ligação (ou momento torçor na ligação), kgf.cm ;

N_d = força normal atuante na ligação, kgf;

V_d = força cortante atuante na ligação, kgf;

n = número de planos colados da ligação, adimensional;

h_1 e h_2 = altura das lâminas coladas na ligação, cm;

α = ângulo de colagem entre as fibras da madeira, graus;

$f_{tor90,d}$ = resistência de junta colada à 90° rompida por torção, kgf/cm²;

$f_{v\alpha,d}$ = resistência de junta colada à α° rompida por compressão, kgf/cm²;

$f_{v90,d}$ = resistência de junta colada à 90° rompida por compressão, kgf/cm²;

Para uso da equação 2, na forma apresentada anteriormente, são necessárias as determinações das resistências ao cisalhamento de juntas coladas à torção - $f_{tor90,d}$ e, também, ao cisalhamento na compressão - $f_{v\alpha,d}$ e $f_{v90,d}$. A primeira resistência, $f_{tor90,d}$ pode ser obtida usando a metodologia proposta por Petrauski *et al.* (2020) e as outras resistências, para cisalhamento à compressão, podem ser obtidas usando a metodologia descrita, por exemplo, pela ASTM D-905 (ASTM, 2013).

Recentemente, Possa *et al.* (2022) utilizaram a formulação apresentada na equação 2 para dimensionamento de ligações de pórticos triarticulados com tirantes feitos com madeira de *Pinus sp.* e colados com adesivo à base de óleos vegetais. Os resultados de desempenho dos pórticos foram também muito promissores julgando critérios de resistência e de rigidez.

Couri Petrauski (2022) analisou os resultados de cinco pesquisas básicas independentes associadas à colagem de madeira com adesivos resorcinol formaldeído e adesivo bicomponente à base de óleo de mamona. A pesquisadora destaca as seguintes conclusões principais: a) quando juntas coladas são rompidas ao cisalhamento na compressão, ensaio normatizado, a resistência para colagens em diferentes ângulos (α) pode ser estimada pela fórmula de Hankinson; b) a fórmula de Hankinson pode ser usada, sem perda da segurança, quando do uso do expoente dos senos e cossenos da fórmula com valor fixo igual a 2; c) a resistência ao cisalhamento na torção difere da resistência ao cisalhamento sob compressão.

A grande maioria das pesquisas básicas realizadas até o momento, procurando subsidiar metodologias para dimensionamento de ligações coladas, a exemplo da equação 2, foram realizadas utilizando madeira de *Eucalipto sp* e dois adesivos: o resorcinol formaldeído e o adesivo bicomponente à base de óleos

vegetais. Atualmente, haja vista a interrupção do uso do adesivo resorcinol formaldeído, novas pesquisas podem ser conduzidas procurando-se confirmar ou não as expectativas até então obtidas. Ainda, parece adequado que, para além do uso de outros adesivos promissores, sejam utilizadas nas pesquisas básicas outras essências florestais aptas ao reflorestamento. Nesse caso, dada a realidade da região Sul do país, parece adequado estudar fenômenos de adesão com o gênero *Pinus sp.*

2.3 TEORIA DA ADESÃO

Os mecanismos de adesão têm sido estudados há anos e muitas teorias são propostas para o fenômeno. Entretanto, nenhuma delas é capaz de justificar todos os aspectos de aderência e, provavelmente, a combinação entre elas é a que mais se aproxima da realidade (PIZZI, MITTAL, 1994). Com relação a madeira, dentre as várias teorias que procuram explicar o fenômeno da adesão, duas das mais importantes são a teoria do enganchamento mecânico e a teoria da adsorção.

A adsorção compreende um fenômeno de superfície que consiste na fixação de moléculas ou átomos de uma substância na superfície da outra. A teoria da adsorção estabelece que a adesão é resultante do contato molecular entre dois materiais que desenvolvem forças de atração superficialmente. Para que ocorra um contato íntimo e contínuo entre um adesivo e um substrato, é necessário que o adesivo umidifique a madeira. Esse fenômeno envolve a migração do adesivo para dentro da estrutura submicroscópica da parede celular, expulsando o ar, a água e outros componentes estranhos à superfície de contato da madeira. O umedecimento depende de vários fatores, tais como a mobilidade do adesivo, a pressão no adesivo e o tempo disponível até que o endurecimento do adesivo imobilize-o (GALEMBECK E GANDUR, 2001). De acordo com Gent e Hamed (1990), para que duas substâncias possam desenvolver uma interação direta, as moléculas de uma devem aproximar-se poucos angstroms da outra. Ou seja, considerado o relacionamento sólido/líquido, o líquido deve ser adsorvido pelo sólido.

Segundo a teoria do enganchamento mecânico, a penetração do adesivo nas cavidades, poros e asperezas da superfície do substrato leva à formação de ganchos ou entrelaçamento mecânico, que se prende nas camadas superficiais do substrato após a cura e endurecimento do adesivo. De acordo com essa teoria, o aumento da adesão mecânica pode ser atribuído ao aumento da área interfacial devido à

rugosidade da superfície, desde que esta superfície apresente coesão suficiente para suportar esforços (SCHULTZ e NARDIN, 1994).

A interligação mecânica é provavelmente o mecanismo principal pelo qual as colas aderem a estruturas porosas, como a madeira. Uma interligação mecânica eficaz ocorre quando as colas penetram através da superfície, a cerca de duas a seis camadas celulares de profundidade. Uma penetração microestrutural mais profunda aumenta a área superficial de contato entre a cola e a madeira, provocando assim uma interligação mecânica mais eficaz. As ligações estruturais mais duráveis da madeira são aquelas que se desenvolvem não só quando a cola penetra nas cavidades celulares, como também quando a cola se difunde nas paredes celulares formando uma ligação a nível molecular com as hemiceluloses e celuloses da madeira (VICK, 1999, apud ROSA, 2008.). Se uma cola penetra suficientemente fundo na madeira e se torna rígida após a sua cura, é expectável que a resistência da ligação seja semelhante a resistência da própria madeira.

2.4 PROCESSO DE COLAGEM

O processo de colagem de madeiras se inicia com a aplicação do adesivo sobre a superfície do substrato e nele ocorrem várias fases de movimento do adesivo que finalizam com a sua solidificação, formando ganchos ou pontos de ancoragem entre duas peças coladas. O grau de adesão depende da intensidade adesiva de cada elo de ligação, ou seja, dos aderentes, do adesivo e das interfaces (SCHULTZ E NARDIN, 1994; BIANCHE, 2014). Segundo Marra (1992), no processo de colagem as seguintes fases de movimento e mobilidade são observadas: fluidez; transferência; penetração; umedecimento e solidificação.

Desse modo, em colagem de peças de madeira, o adesivo é o material que possui mobilidade molecular suficiente para proporcionar o contato íntimo com as superfícies de uma junta adesiva. A partir de transformações moleculares, o adesivo gera forças internas de coesão e o contato íntimo com as superfícies permite a atuação de forças interfaciais de adesão capazes de promover a integração do sistema. Não obstante, a viscosidade do adesivo e seu tempo de trabalho tornam-se fatores determinantes para qualidade da adesão e execução da junta colada.

Desencadeado o processo de adesão, as fases de cura e endurecimento irão garantir o desempenho do conjunto, ou seja, existe uma interação entre a formação e o desempenho das ligações.

A pressão de colagem influencia na penetração do adesivo na madeira, sendo que pressões muito altas podem gerar uma movimentação excessiva do adesivo fazendo com que ele transborde para fora da junta colada. No sentido oposto, pressões muito baixas podem diminuir a penetração do adesivo na madeira. A pressão de colagem também pode variar segundo a massa específica da madeira (TIENNE, 2006).

A densidade da madeira apresenta uma relação inversa com a porosidade e a penetração de adesivos. Em madeiras de baixa densidade, ocorre maior penetração do adesivo e poderá resultar em linha de cola “faminta”. Já em madeiras de alta densidade, há maiores alterações dimensionais resultantes das variações de teor de umidade, gerando maiores tensões de linha de cola, dificultando o processo de colagem (IWAKIRI, 2005 apud BIANCHE, 2014).

Carrasco (1984) ressalta a relação entre a eficiência da ligação colada com a preparação dos aderentes antes da aplicação do adesivo. Lembrando que, na preparação do aderente, é necessário remover o pó, o óleo, o óxido ou qualquer outro material capaz de reter o ar ou de impedir o contato do adesivo com o aderente, prejudicando a ligação. Outra medida apontada pelo autor é aplainar as superfícies muito rugosas, promovendo um contato íntimo e melhor fluxo do adesivo.

A própria anatomia e o método de preparação da superfície da madeira determinam a sua rugosidade superficial. Quando cortados durante a preparação da superfície, os vasos condutores, os canais resinosos e as células em geral criam diversas aberturas ou porosidades na madeira (DUNKY, 2002 apud ROSA, 2008).

2.4 ADESIVOS POLIURETANOS

Poliuretanos (PUR) são formados pela reação entre um grupo isocianato e uma hidroxila (poliol), gerando ligações uretânicas em sua cadeia principal. Suas características permitem diversas aplicações dentro do mercado de materiais para revestimentos, fibras, adesivos, borrachas, espumas e plásticos. A grande versatilidade dos poliuretanos deve-se as diferentes propriedades físicas e químicas,

que esses materiais podem apresentar ao utilizar diferentes monômeros, polióis e diisocianatos, em sua síntese (GURGEL, 2019).

O termo “poliol” é uma nomenclatura particular para álcoois polifuncionais, empregados na química de poliuretanos. São compostos oligoméricos ou não, di ou poli hidroxilados que, ao lado dos isocianatos, são os componentes essenciais para a formulação dos poliuretanos (SILVA, 2014). Os polióis podem ser sintetizados por rota petroquímica, porém, moléculas contendo hidroxilas são abundantes na natureza. Dessa maneira, visando à substituição dos polióis oriundos da indústria petroquímica, busca-se a implantação de biopolióis oriundos de fontes renováveis (MENDONZA *et al.*, 2017; GURGEL, 2019).

Os poliuretanos são comercializados em dois sistemas, os monocomponentes e os bicomponentes. Os monocomponentes estão na fase de pré-polímero, na qual a cura ocorre com a umidade do ar. Os bicomponentes são adesivos separados nos componentes isocianato e poliol, os quais são misturados apenas no momento de utilização, permitindo dosagem dos componentes conforme utilização final do adesivo (SILVA, 2014).

Alves *et al.* (2021) analisaram 13 óleos vegetais como fonte de polióis para a síntese de poliuretanos. Em sua pesquisa, constatou-se que há uma grande potencialidade na utilização de óleos oriundos de vegetais nativos ou cultivados no Brasil, com destaque para o óleo de mamona, o qual não necessita de tratamento químico para transformar seu óleo em poliol.

Com o emprego de materiais sustentáveis, alguns pesquisadores buscam compreender melhor a qualidade da adesão em diferentes espécies de madeira, proporcionada pelo uso de adesivos poliuretanos.

Segundinho *et al.* (2018) caracterizaram a madeira lamelada colada (MLC) de *Eucalyptus sp.* com o emprego de adesivo poliuretano. Suas pesquisas utilizaram o adesivo associado à pressão de colagem de 1 MPa e gramatura de 300 g/m². Essa combinação gerou valores de resistência da junta colada satisfatórios para a condição seca, demonstrando a viabilidade do adesivo poliuretano em confecção de MLC para utilização estrutural interna.

As pesquisas de Stringari (2019), Filippini (2020) e Possa *et al.* (2022) utilizaram adesivo poliuretano bicomponente a base de óleos vegetais na confecção de pórticos em MLC. As três pesquisas obtiveram valores satisfatórios de resistência

estrutural empregando o adesivo bicomponente nas proporções de 1:1,5 de isocianato e polioliol para diferentes espécies de madeira de coníferas.

Não obstante, Bianche (2017) estudou juntas coladas confeccionadas com o adesivo poliuretano a base de óleo de mamona nas proporções de 1:1,5 (isocianato e polioliol) empregando diferentes gramaturas. Sua pesquisa obteve valores de resistência semelhantes a madeira sólida e constatou que a gramatura de 300 g/m² foi suficiente para promover a maior resistência do adesivo na linha de cola. Na mesma pesquisa, foi delimitado o tempo de trabalho do adesivo como de 38 min para esta proporção.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 GENERALIDADES

Toda a parte experimental da pesquisa foi conduzida no Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME) em conjunto com o Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira (LATEM), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus Cascavel.

Os materiais utilizados neste estudo foram a madeira de *Pinus sp.*, denominada comercialmente de pinus, e o adesivo poliuretano bicomponente à base de óleos vegetais.

Antes da aquisição das tábuas, essas foram previamente avaliadas por inspeção visual. A inspeção foi executada com o intuito de mitigar a presença de defeitos. Sendo assim, não foram aceitas para o lote de pesquisa as tábuas que apresentassem excessos de defeitos, como empenamentos, encanoamentos, nós, medula e demais características prejudiciais.

Esse lote de madeira consistiu na aquisição de 75 tábuas com dimensões próximas a 2,5 x 20 x 300 cm e 30 tábuas com dimensões próximas a 2,5 x 15 x 300 cm. Dessa maneira, o lote foi de madeira pré-selecionada totalizando aproximadamente 1,46 m³, sendo que todas foram obtidas em comércio local.

As tábuas foram devidamente estocadas no LATEM da UNIOESTE, conforme Figura 3. Dentro do laboratório eram protegidas de intempéries e dispostas com espaçamento entre as tábuas para possibilitar a circulação de ar e secagem até o equilíbrio hidrocópico com o meio, estimado em aproximadamente 12% de umidade.



Figura 3 – Conformação do lote da pesquisa

Fonte: autor, 2022

Após a madeira atingir a umidade de equilíbrio com o meio, se iniciou o processamento. Com a passagem do lote em plaina desengrossadeira nos dois lados das tábuas, todas as tábuas tiveram espessura padronizada próximo a 22 mm, e superfícies limpas para melhor avaliação de defeitos, conforme observado na Figura 4.



Figura 4 – Tábuas desengrossadas

Fonte: autor, 2022.

Com as tábuas padronizadas e desengrossadas, essas foram processadas em serra circular, pesadas e catalogadas com o intuito de classificar o material de uso, especialmente em relação à densidade aparente. A Figura 5 ilustra os principais equipamentos que foram utilizados no processamento da madeira.



Figura 5 – Desempenadeira (a), serra circular (b) e plaina desengrossadeira (c).

Fonte: Possa, 2022.

O lote de madeira foi dividido conforme a densidade aparente, com o intuito de evitar favorecimentos por tipologia de ensaio e ângulos de colagem. Para isso, o experimento foi realizado em parcelas subdivididas com delineamento em blocos casualizados devido à variabilidade encontrada na densidade do lote. Inicialmente, as madeiras foram separadas em 8 grupos, cujos valores médios de densidade eram: G1 = 0,694 g/cm³; G2 = 0,624 g/cm³; G3 = 0,592 g/cm³; G4 = 0,559 g/cm³; G5 = 0,563 g/cm³; G6 = 0,531 g/cm³; G7 = 0,512 g/cm³ e G8 = 0,427 g/cm³. Esses grupos são os chamados blocos do experimento.

3.2 PARÂMETROS DE COLAGEM COM O ADESIVO POLIURETANO.

O adesivo utilizado foi o poliuretano bicomponente a base de óleos vegetais, fabricado pela Kehl Indústria e Comércio Ltda, código KDG1909, comercializado na forma dos componentes isocianato e polioli.

Durante toda a fase da pesquisa, o adesivo poliuretano foi aplicado nas proporções de 1:1,5 de isocianato e polioli e espalhado apenas em uma face a ser colada com o auxílio de trincha.

O adesivo foi utilizado associado a uma pressão de colagem de 1,0 MPa executada em prensa manual existente no LATEM, conforme Figura 6. A quantidade de adesivo aplicada foi na gramatura de 300g/m², o tempo em fechado foi inferior a 20 min e o tempo de prensagem de no mínimo 12 horas. No ambiente de colagem, procurou-se manter a temperatura do laboratório em aproximadamente 23°.

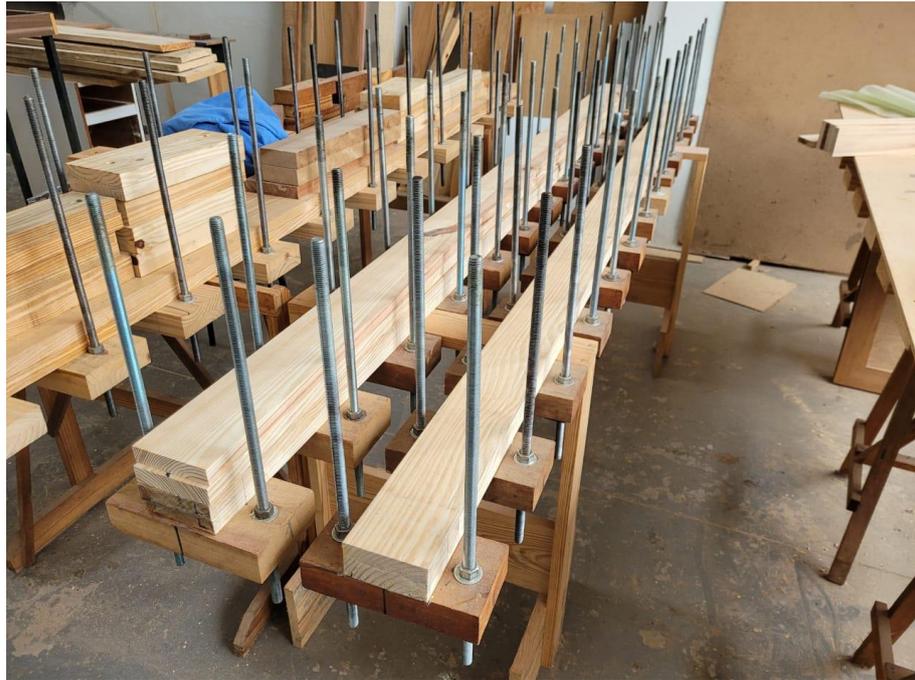


Figura 6 – Prensa manual

Fonte: autor, 2022

Para garantir a pressão de colagem, foi realizado teste de torque em cada prensa utilizada. O procedimento foi realizado com o auxílio de célula de carga e de torquímetro eletrônico (Figura 7). Desta forma gerou-se correlação linear entre o valor de torque e o valor de força na prensagem. Esse procedimento foi feito em cada conjunto de 2 barras rosqueáveis.



Figura 7 – Torquímetro eletrônico

Fonte: autor, 2022.

A gramatura de 300 g/m² foi garantida com o posicionamento de cada peça em balança analítica e posterior espalhamento do adesivo sobre a superfície colada.

3.3 EXPERIMENTAÇÃO COM DIFERENTES ÂNGULOS DE COLAGEM

De modo a atender os objetivos específicos da pesquisa, foi empregada para a confecção de juntas coladas uma série de nove ângulos distintos (0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° e 90°) de modo a gerar corpos de prova destinados a avaliação da resistência ao cisalhamento à compressão e cisalhamento à torção.

A escolha desses nove diferentes ângulos deveu-se a vantagem de realizar um experimento balanceado, objetivando maior acurácia na predição proveniente do modelo de regressão e do equipamento de pressão utilizado.

A colagem foi executada com a colocação de lâminas nas dimensões aproximadas de 2,1 x 6 x 12 cm (espessura, largura, comprimento), posicionadas sobre lâminas nas dimensões de 2,1 x 14 x 15 cm, de acordo com o ângulo previsto. Cada lâmina foi colada com outra de densidade semelhante de modo a formar corpos de prova homogêneos. O modelo de colagem pode ser observado na Figura 9.

Para garantir o posicionamento das lâminas no ângulo de colagem, essas lâminas foram travadas nas posições com o auxílio de talas laterais parafusadas. É possível observar as talas de contenção na Figura 8.



Figura 8 – Colagem em ângulo com contenções laterais.

Fonte: autor, 2023.

A superfície de cada lâmina, a compor a junta colada, teve seu último processamento realizado no dia da colagem, com o intuito de expor as fibras da madeira para receber o adesivo. Para tal procedimento, a lâmina colada teve sua espessura reduzida, utilizando a plaina desengrossadeira, com posterior limpeza mecânica com ar comprimido e trincha.

Perceba-se, no lado direito da Figura 9, que de cada junta colada foi previsto extrair dois corpos de prova pareados, um para ensaio à compressão (C) e outro para torção (T).

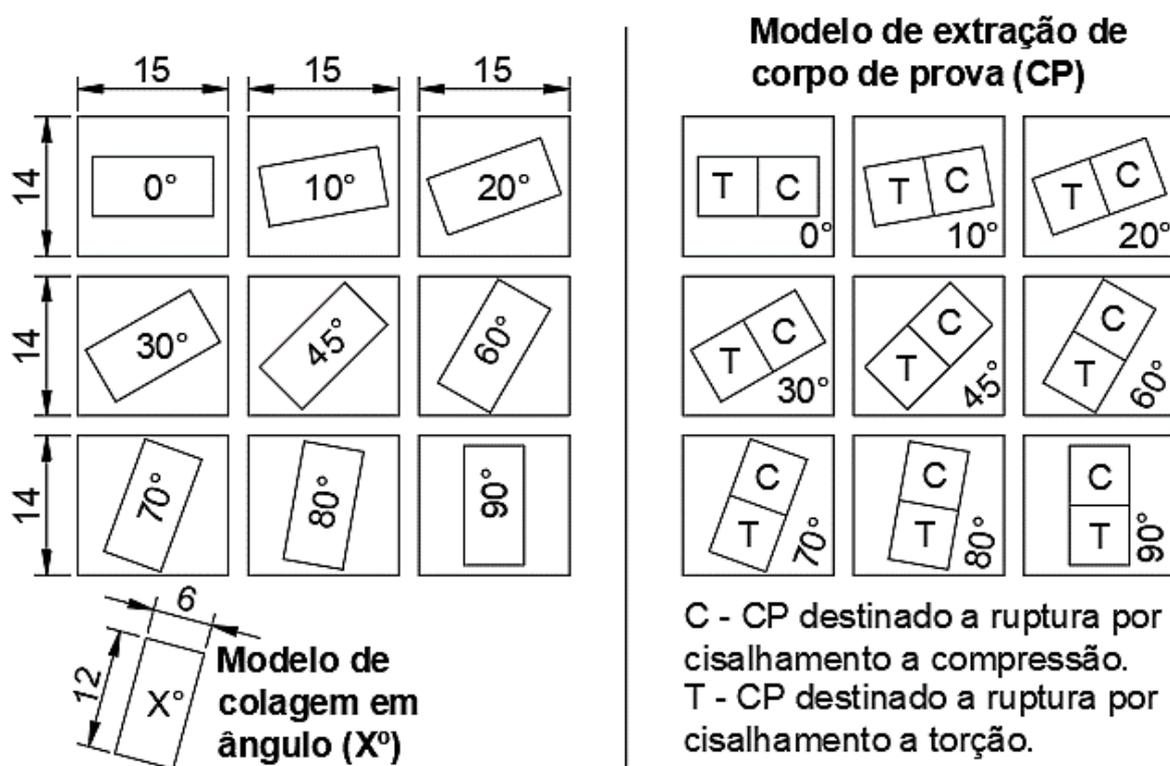


Figura 9 – Modelo de colagem e extração de corpos de prova.

Fonte: Autor, 2022.

No total, obteve-se 72 parcelas que, ao finalizar o processo de colagem, foram subdivididas em duas partes de tamanhos iguais. Cada metade foi aleatorizada e uma das partes submetida ao ensaio de compressão (C) e a outra a torção (T) para avaliar a resistência ao cisalhamento dos corpos colados.

Todos os corpos de prova, extraídos e destinados à ruptura por cisalhamento à compressão (C), foram confeccionados e ensaiados segundo as diretrizes da ASTM D 905 (ASTM, 2013), Figura 10, sendo acoplados em aparato específico e submetidos à carga por máquina universal de ensaios. Para melhor quantificação da força, foi utilizada célula de carga de 5000 kgf. O aparato disponível no LATEM é exposto na

Figura 11. Os valores de resistência foram corrigidos para o teor de umidade de 12% segundo a orientação da norma NBR7190 (ABNT, 2022).

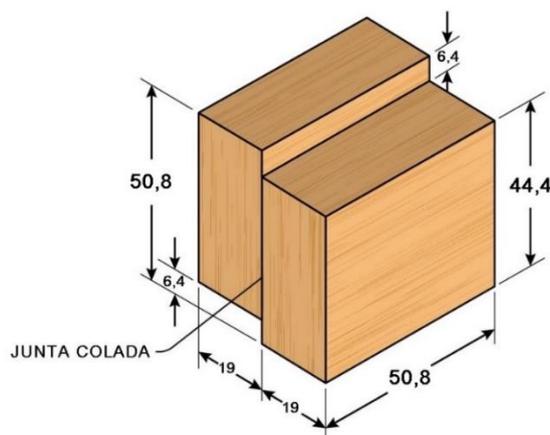


Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento a compressão da junta colada, dimensões em mm.

Fonte: Possa, 2022.



Figura 11 – Aparato para cisalhamento na compressão.

Fonte: Autor, 2022.

Os corpos de prova destinados a ruptura por cisalhamento à torção foram ensaiados segundo metodologia proposta por Petrauski *et. al.* (2020), sendo configurados com seção de ruptura em formato circular como mostra a Figura 12.

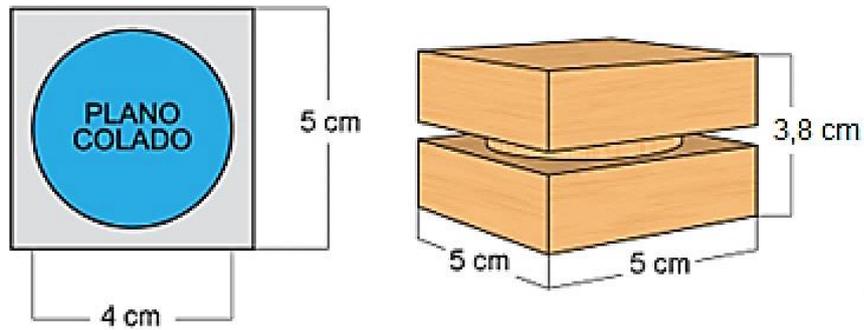


Figura 12 – Corpo de prova para ensaio da resistência ao cisalhamento na torção.

Fonte: Possa, 2022 (adaptado).

A carga para ensaio de cisalhamento à torção foi aplicada por Máquina Universal de Ensaios e a leitura com a utilização de célula de carga de 5000 kgf. Todos os equipamentos estão presentes no LEME e LATEM. Essa metodologia consiste na utilização de um aparato que induz o plano colado ao esforço de torção pura. O aparato pode ser observado na Figura 13, estando posicionado em máquina universal de ensaios.



Figura 13 – Ensaio de cisalhamento na torção com o aparato na Máquina Universal de Ensaios.

Fonte: Stringari, 2019.

O cálculo da resistência ao cisalhamento na torção seguiu as diretrizes da Equação 3:

$$\tau_{max} = \frac{T.c}{I_p} \quad (3)$$

Onde:

τ_{max} = tensão máxima ao cisalhamento na torção de juntas coladas (N.m⁻²);

T = momento de torção na ruptura (N.m);

I_p = momento polar de inércia (m⁴).

c = raio da seção de ruptura (m).

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS OBTIDAS PELA COMPRESSÃO E TORÇÃO

Para cada um dos ângulos estudados, foram confeccionados oito corpos de prova para cisalhamento à compressão e oito corpos de prova para cisalhamento à torção. Portanto, o experimento com os nove ângulos de colagem, oito repetições por ângulo (grupos de densidade) e duas tipologias de ensaio (compressão e torção), gerou o montante de 144 corpos de prova rompidos. Todos os corpos de prova foram rompidos, respeitando 10 dias para a cura do adesivo.

Assim, assumiu-se o modelo estatístico para a resistência ao cisalhamento (y_{ijk}), como sendo:

$$y_{ijk} = \mu + g_k + \alpha_i + e_{ik} + \tau_j + (\alpha\tau)_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad (4)$$

Onde:

μ é o efeito médio geral;

g_k é o efeito do k -ésimo grupo/bloco;

α_i é o efeito do i -ésimo ângulo;

e_{ik} é o efeito do erro a nível de parcelas, com distribuição Normal de média zero e variância σ_1^2 ;

τ_j é o efeito do j -ésimo ensaio;

$(\alpha\tau)_{ij}$ é o efeito da interação entre o i -ésimo ângulo e o j -ésimo ensaio;

ε_{ijk} é o erro experimental associado subparcelas, com distribuição Normal de média zero e variância σ_2^2 ;

$i = 1, 2, \dots, 9$;

$j = 1$ ou 2 ;

$k=1, 2, \dots, 8.$

As pressuposições em relação ao modelo foram avaliadas por meio de análises gráficas, de medidas descritivas e de testes estatísticos. A normalidade dos resíduos foi verificada por meio do teste de Shapiro Wilk e a homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett.

Satisfeitas as condições, os efeitos de interesse (α_i , τ_j e $(\alpha\tau)_{ij}$) são avaliados por meio do teste F da análise de variância (ANOVA), sendo que quando identificada diferença significativa entre os níveis do fator, é aplicado o teste Tukey de comparação das médias.

O nível nominal de significância em todos os testes foi de 5% e, sendo assim, se o nível descritivo (p-valor) for menor que 0,05, pode-se rejeitar a hipótese de nulidade, ou seja, na ANOVA pode-se afirmar que existe diferença significativa entre os níveis do(s) fator(es) analisado(s).

Para o estudo dos níveis do fator ângulo em cada um dos ensaios, ajustou-se o modelo não linear de Hankinson descrito pela seguinte expressão:

$$\bar{y}_{ij} = \frac{f_{w0j} \cdot f_{w90j}}{f_{w0j} \cdot (\text{sen}(\alpha_i))^{b_j} + f_{w90j} \cdot (\text{cos}(\alpha_i))^{b_j}} + e_{ij}. \quad (5)$$

Onde:

\bar{y}_{ij} é a resistência média do i -ésimo ângulo no j -ésimo ensaio;

f_{w0j} é o valor da resistência média assintótica do j -ésimo ensaio quando o ângulo tende a zero graus;

f_{w90j} é o valor da resistência média assintótica do j -ésimo ensaio quando o ângulo tende a noventa graus;

b_j é o coeficiente de decrescimento da resistência;

e_{ij} é o erro experimental, e as demais variáveis são como definidas na equação 5.

Perceba que, quando $\alpha_i = 0^\circ \Rightarrow \hat{y}_{ij} = \frac{\hat{f}_{w0j} \cdot \hat{f}_{w90j}}{\hat{f}_{w0j} \cdot (\text{sen}(0^\circ))^{b_j} + \hat{f}_{w90j} \cdot (\text{cos}(0^\circ))^{b_j}}$

$$= \frac{\hat{f}_{w0j} \cdot \hat{f}_{w90j}}{\hat{f}_{w0j} \cdot 0^{b_j} + \hat{f}_{w90j} \cdot 1^{b_j}}$$

$$= \frac{\hat{f}_{w0j} \cdot \hat{f}_{w90j}}{\hat{f}_{w90j}} = \hat{f}_{w0j}$$

$$\text{Para } \alpha_i = 90^\circ \Rightarrow \hat{y}_{ij} = \frac{\hat{f}_{w0j} \cdot \hat{f}_{w90j}}{\hat{f}_{w0j} \cdot (\sin(90^\circ))^{\hat{b}_j} + \hat{f}_{w90j} \cdot (\cos(90^\circ))^{\hat{b}_j}} = \frac{\hat{f}_{w0j} \cdot \hat{f}_{w90j}}{\hat{f}_{w0j} \cdot 1^{\hat{b}_j} + \hat{f}_{w90j} \cdot 0^{\hat{b}_j}} = \frac{\hat{f}_{w0j} \cdot \hat{f}_{w90j}}{\hat{f}_{w0j}} = \hat{f}_{w90j}$$

A variável \hat{y}_{ij} , e os parâmetros \hat{f}_{w0j} , \hat{f}_{w90j} e \hat{b}_j apresentam o acento circunflexo, pois representam o resultado estimado pelo modelo. Nesse trabalho utilizou-se o processo de estimação dos mínimos quadrados. Note na Figura 14, que assumindo $\hat{f}_{w0j} = 10$, $\hat{f}_{w90j} = 4$ e variando \hat{b}_j , a curvatura do modelo sigmoide se modifica; quanto maior, menos rápido é o decaimento do valor da resistência no decorrer dos ângulos.

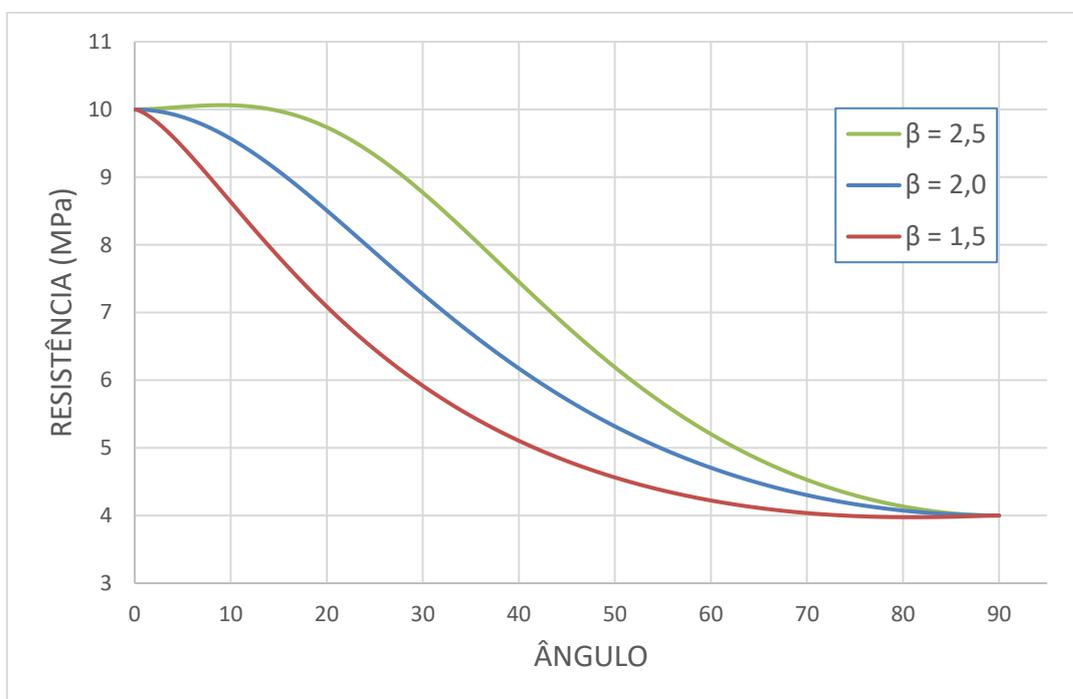


Figura 14 - Exemplo de curvas do modelo de Hankinson assumindo $\hat{f}_{w0j} = 100$, $\hat{f}_{w90j} = 40$ e variando \hat{b}_j em 1,5; 2 e 2,5.

Fonte: autor, 2023

A qualidade do ajuste do modelo de Hankinson foi avaliada por meio de análises gráficas e estatísticas, observando a soma de quadrados residual dos modelos e o coeficiente de determinação (R^2). Esse indica quanto da variância da variável resposta é explicada pela variância das variáveis explicativas. Seu valor está no intervalo de 0 a 1. Quanto maior, mais explicativo é o modelo.

$$R_j^2 = 1 - \frac{SQRes}{SQTotal} \quad (6)$$

Sendo que: $SQRes$ é a soma de quadrados residual e $SQTotal$ é a soma de quadrados total do modelo de Hankinson para o j -ésimo ensaio.

Todas as análises desse trabalho foram realizadas no software R (R Core Team, 2022), versão 4.2.1, com utilização dos pacotes `ggplot2`, para a construção dos gráficos, e `ExpDes`, para análise do experimento – testes da ANOVA e Tukey.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROCESSAMENTO DA MADEIRA

As peças de madeira foram separadas e processadas no dia da colagem. As lâminas foram padronizadas com 2,1 cm de espessura, porém, para garantir a limpeza completa das peças em plaina desengrossadeira, foi necessário diminuir aproximadamente 0,1 cm a mais na espessura das peças dos grupos G4 e G8. Logo, esses grupos ficaram com as lâminas com espessura de aproximadamente 2 cm.

Após processamento em desengrossadeira, as peças foram subdivididas com o uso de serra circular de bancada. Para evitar os defeitos, algumas peças de base não obtiveram a largura total de 15 cm. Desse modo, as peças mais estreitas foram destinadas a compor o ângulo de 90°. O ângulo de 90° permitiu o posicionamento da lâmina superior (a formar o ângulo) com relativo excesso de folga nas laterais da lâmina de base, possibilitando o uso de peças de base mais estreitas.

Foram colados em prensa manual dois grupos de densidade por período de colagem, em sala climatizada. Os dias, grupos colados, temperatura da sala, umidade relativa do ar, e umidade média da madeira estão expostos na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Informações de variáveis nos dias de colagem

Dia de colagem	Grupos colados	Temperatura	Umidade do ar	Umidade média da madeira
29/11/2022	G2 - G6	23,4 °C	40%	12,2 %
01/12/2022	G4 - G8	22,8 °C	44%	11,9 %
01/12/2022	G1 - G5	22,5 °C	46%	11,9 %
02/12/2022	G3 - G7	22,8 °C	48%	12,3 %

Cada conjunto da prensa foi fechado com um ângulo de ensaio e com os dois grupos de densidade arranjados um sobre o outro. Para aplicação da pressão foi posicionada uma peça de distribuição acima dos conjuntos e aplicado o torque correspondente para gerar a força de prensagem. É possível observar essa conformação na Figura 15.



Figura 15 – Conformação dos conjuntos em prensa manual.

Fonte: autor, 2022.

Após o tempo de prensagem, as peças foram processadas em serra circular de bancada, separando as partes coladas em peças de dimensões aproximadas de 50,8 x 50,8 x 42 mm, com exceção do grupo G4 e G8, em que as peças geraram espessuras de aproximadamente 40,5mm. Cada junta colada teve uma de suas peças destinada ao ensaio de cisalhamento à compressão e uma ao cisalhamento à torção. Nessa fase foi possível registrar a densidade de todos os corpos de prova. A densidade variou de 0,397 g/cm³ a 0,721 g/cm³, com média do lote de 0,563 g/cm³. Os valores assemelham-se aos obtidos por Possa *et al.* (2022) no qual o intervalo foi de 0,42 g/cm³ a 0,75 g/cm³, sendo a densidade média do lote igual a 0,52 g/cm³.

Os corpos de prova a serem submetidos à compressão foram confeccionados e ensaiados segundo os padrões da ASTM D 905 (ASTM, 2013), à exceção da espessura das lâminas coladas que foi admitida um pouco superior ao recomendado.

Os corpos de prova a serem submetidos à torção foram confeccionados segundo metodologia proposta por Petrauski *et al.* (2020). Para esses foi adotado um diâmetro médio do plano colado de 46,6mm objetivando áreas coladas similares aos corpos da ASTM D-905 (ASTM, 2013).

4.2 ENSAIO EM MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS

Todos os corpos de prova foram rompidos em Máquina Universal de Ensaio. A maioria dos corpos de prova romperam no plano colado, tanto para o ensaio de compressão como para torção.

Durante os ensaios à compressão e à torção, em alguns corpos de prova, foi observada a formação de fissuras na madeira sólida, gerando superfícies de ruptura fora do plano colado, como é possível observar na Figura 16 e Figura 17.



Figura 16 – Fissuração fora do plano colado em corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento à torção, corpo de prova do grupo G1 e ângulo de 0°.

Fonte: autor, 2023.



Figura 17 – Fissuração fora do plano colado em corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento à compressão. Corpo referente ao grupo G2 e ângulo de 10°.

Fonte: autor, 2023.

A fissuração extrapolando as lâminas da madeira e gerando ruptura fora do plano colado foi mais recorrente no ensaio de cisalhamento à torção, porém representam a minoria dos corpos de prova, sendo considerado exceção.

Independente da conformação de ruptura, os resultados numéricos de resistência foram considerados válidos para análise estatística.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Ao avaliar a resistência obtida de acordo com os grupos de densidade, o tipo de ensaio e os ângulos de colagem, foi possível observar que corpos de prova com maiores valores de densidades resultaram em maiores resistências (Figura 18). Os resultados de resistência foram, em média, maiores no ensaio de cisalhamento à compressão entre os ângulos de 0° a 45°. Para os demais ângulos, o ensaio à torção apresentou maiores resultados médios de resistência. Ambos os ensaios apresentaram decréscimo na resistência conforme o ângulo aumentava (Tabela 2). Além disso, é possível observar a variabilidade (desvio-padrão) dos resultados, sendo que no ângulo 10° foram encontradas as maiores dispersões na resistência tanto para o ensaio à compressão quanto à torção. A Figura 19 ilustra melhor a variabilidade dos

dados de acordo com os ângulos e o ensaio. Nota-se que, segundo a distância entre quartis, existem resultados considerados discrepantes nos ensaios de compressão a 70° e 90° e no ensaio de torção a 30°.

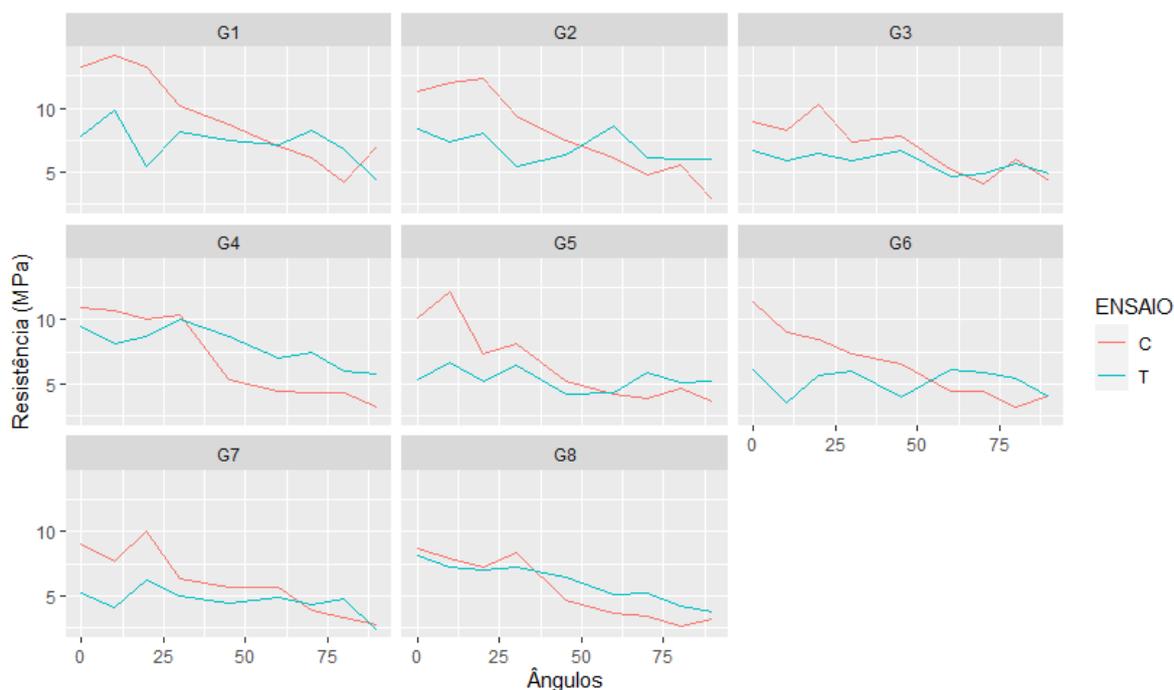


Figura 18 - Gráficos referentes a tendência da resistência conforme material/grupo de densidade da madeira e ensaio (C ou T) nos diferentes ângulos de colagem.

Fonte: autor, 2023.

Tabela 2: Resistências médias ao cisalhamento, incluso desvio padrão, por ensaio e ângulos de colagem.

Ângulos	Resistências médias por ensaios (MPa)	
	Compressão	Torção
0°	10,46 ± 1,58	7,13 ± 1,54
10°	10,22 ± 2,38	6,60 ± 2,10
20°	9,87 ± 2,17	6,61 ± 1,24
30°	8,44 ± 1,45	6,78 ± 1,65
45°	6,40 ± 1,45	6,03 ± 1,68
60°	5,10 ± 1,13	5,97 ± 1,52
70°	4,39 ± 0,84	5,99 ± 1,33
80°	4,22 ± 1,18	5,50 ± 0,82
90°	3,90 ± 1,37	4,52 ± 1,20

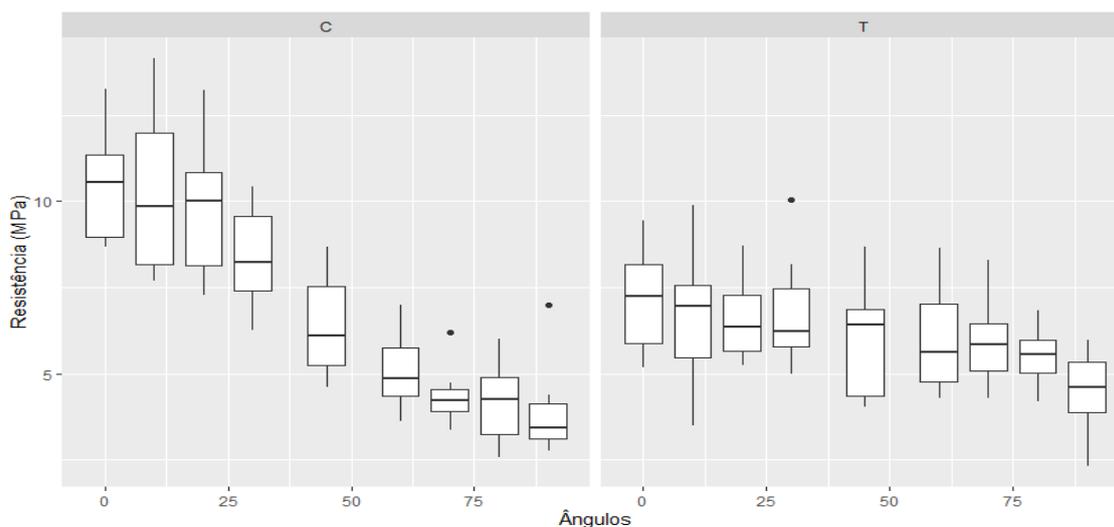


Figura 19 - Gráficos boxplot referentes a resistência conforme ângulo de colagem e ensaio (C ou T).

Fonte: autor, 2023.

A madeira utilizada teve sua faixa de densidade delimitada pelos grupos de G1 a G8. Essa densidade influenciou de forma direta na qualidade da adesão das juntas coladas com o adesivo poliuretano bicomponente a base de óleos vegetais. As peças de maior densidade tenderam a ter valores de resistência ao cisalhamento superiores, quando comparado as peças de baixa densidade.

Os dois tipos de ensaio indicaram decaimento da resistência com a variação do ângulo, apresentando os maiores valores próximos ao ângulo de 0° (colagem paralela as fibras) e os menores valores próximos ao ângulo de 90° (colagem perpendicular as fibras). O decaimento ficou bem definido nos valores obtidos em ensaio à compressão, porém os ensaios à torção apresentaram valores mais constantes.

Esses resultados condizem com o observado por Possa *et al.* (2022), nos quais os resultados médios de cisalhamento à compressão em 0° foram de 10,3 MPa e a 90° foram de 4,09MPa. E para os ensaios à torção em 0° foram de 8,47 MPa e a 90° foram de 5,54 MPa.

Apesar de obter resultados discrepantes e desvios padrão entre 0,82 e 2,38 entre os tratamentos, a condição de normalidade e homogeneidade das variâncias não foi rejeitada. Ao avaliar os fatores de interesse na pesquisa pelo teste F da ANOVA (Tabela 3), obteve-se que existe interação significativa entre o tipo de ensaio

e o ângulo de colagem, ou seja, conforme se modifica o ângulo e o ensaio a tendência da resistência também é alterada significativamente. Nesse experimento, o coeficiente de variação na primeira parte do ensaio foi de 17,75% e na segunda parte ficou em 17,21%.

Tabela 3: Resumo da ANOVA para os resultados experimentais.

Fontes de Variação	G.L.	Somas de quadrados	Teste F	p-valor
Ângulos	8	381,07	35,09	<0,001
Grupos/Lotes	7	140,04	14,74	<0,001
Erro (parcela)	56	76,02		
Ensaio	1	27,46	21,50	<0,001
Ensaio × Ângulo	8	144,76	14,17	<0,001
Erro (subparcela)	63	80,46		
Total	143	849,80		

cv1 = 17,75% e cv2=17,21%

Ao realizar o desdobramento do fator ângulo dentro de ensaio, tem-se na Tabela 4 que existe diferença significativa entre os ângulos, dado o ensaio ser de torção ou de compressão.

Tabela 4: Resumo da ANOVA dado o desdobramento do fator ângulo dentro de ensaio.

Fontes de Variação	G.L.	Somas de quadrados	Teste F	p-valor
Ângulo/ ensaio: C	8	486,51	46,16	<0,001
Ângulo/ ensaio: T	8	39,32	3,73	<0,001
Erro combinado	118,05	155,51		

Portanto, pelo teste Tukey de comparações múltiplas, tem-se que no ensaio de compressão (C) os ângulos 0°, 10° e 20° não se diferem em média. O mesmo ocorre entre os ângulos 10°, 20° e 30° que formam o chamado grupo b. Já os ângulos 45° e 60° são o grupo c, com médias consideradas não diferentes estatisticamente. E os ângulos 60° a 90° formam o grupo d. Assim, para esse ensaio, podemos afirmar que 0° se diferencia significativamente apenas quando o ângulo é 30° ou maior; 30° se diferencia para ângulo de 45° ou mais e 45° quando o ângulo é de 70° ou maior. Para o ensaio de torção, a maioria dos ângulos não apresentou resultado médio estatisticamente diferente, sendo que apenas o ângulo de 90° se difere dos ângulos entre 0° e 30° (Tabela 5).

Tabela 5: Média e resultado do teste Tukey de comparações múltiplas dado o fator ângulo dentro do fator ensaio C e ensaio T, independentemente.

Ângulo	Ensaio			
	Compressão		Torção	
	Média	Grupos	Média	Grupo
0°	10,46	a	7,13	x
10°	10,22	ab	6,60	x
20°	9,87	ab	6,61	x
30°	8,44	b	6,78	x
45°	6,40	c	6,03	xy
60°	5,10	cd	5,97	xy
70°	4,39	d	5,99	xy
80°	4,22	d	5,50	xy
90°	3,90	d	4,52	y

A análise do desdobramento do fator ensaio dentro de ângulo, pode ser observada na Tabela 6 que indica diferença significativa entre os ensaios quando os ângulos são 0°, 10°, 20°, 30°, 70° e 80°.

Tabela 6: Resumo da ANOVA dado o desdobramento do fator ensaio dentro de ângulo.

Fontes de Variação	G.L.	Somas de quadrados	Teste F	p-valor
Ensaio/ ângulo: 0°	1	44,57	34,67	<0,001
Ensaio/ ângulo: 10°	1	52,44	41,06	<0,001
Ensaio/ ângulo: 20°	1	42,49	33,27	<0,001
Ensaio/ ângulo: 30°	1	11,01	8,62	0,004
Ensaio/ ângulo: 45°	1	0,55	0,43	0,511
Ensaio/ ângulo: 60°	1	3,04	2,38	0,128
Ensaio/ ângulo: 70°	1	10,30	8,07	0,006
Ensaio/ ângulo: 80°	1	6,55	5,12	0,027
Ensaio/ ângulo: 90°	1	1,55	1,21	0,274
Erro (subparcela)	63	80,46		

Portanto, pelo teste Tukey de comparações múltiplas, tem-se que nos ângulos 0°, 10°, 20° e 30° a média à resistência do ensaio de compressão (C) é estatisticamente superior à média do ensaio a torção (T). A 70° e 80°, o resultado se inverte, sendo que a média a Torção é estatisticamente superior comparada com a média no ensaio de compressão. Observe na Figura 20, o comportamento dos valores amostrais dados os ensaios e os ângulos. Os pontos menores representam os valores amostrais obtidos no experimento e os pontos que aparecem em tamanho maior referem-se ao valor médio. Note que, entre os valores médios, o ensaio à compressão

apresenta um comportamento decrescente e sigmoide conforme os ângulos aumentaram. Já o ensaio à torção apresentou resultados mais constantes, com leve decréscimo.

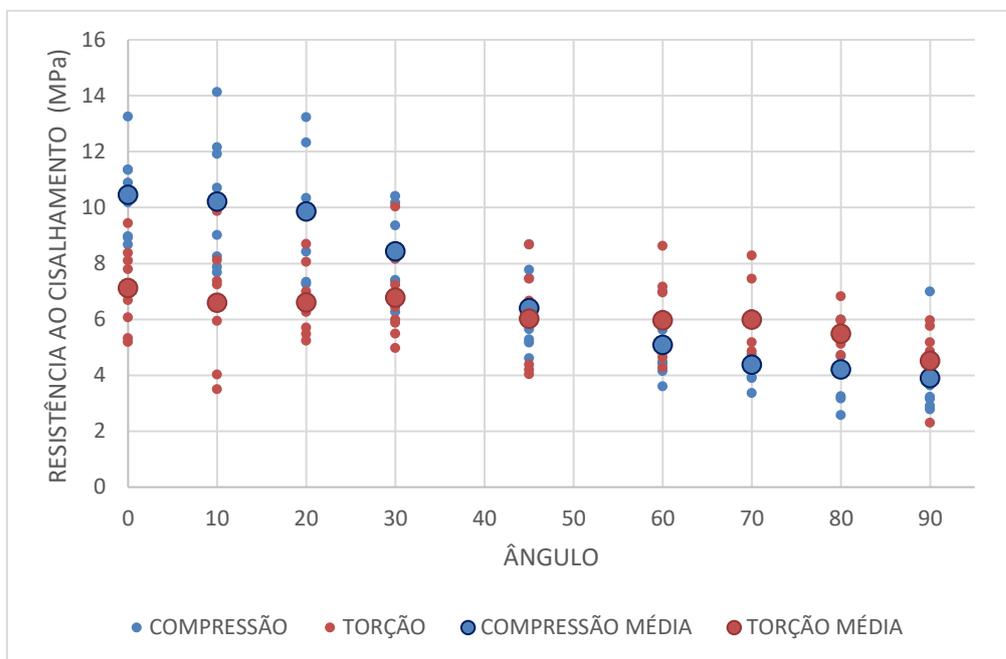


Figura 20 - Gráfico referente a resistência amostral (pontos menores) e resistência média (pontos maiores), de acordo com o ângulo de colagem e o ensaio realizado.

Fonte: autor, 2023.

A disparidade de resistência entre os tipos de ensaios foi superior no início e no final da série de ângulos (próximo ao ângulo de 0° e ao ângulo de 90°), porém não apresentaram diferença média estatística no centro da série, próximo ao ângulo de 45°. Isso parece normal uma vez que, como a própria fórmula de *Hankinson* exige, há queda da resistência com o incremento do ângulo de colagem e, próximo à série central, os resultados de compressão, se equivalem aos resultados de torção (Petrauski *et. al.*, 2020).

Para ângulos próximos a 0°, a resistência média à torção foi estatisticamente menor que a resistência média à compressão, sugerindo riscos mecânicos para ligações dimensionadas exclusivamente pelos valores de ensaio à compressão, que estejam sujeitas a esforços estruturais de torção.

Ao modelar a curva de *Hankinson*, obteve-se a função para o ensaio de cisalhamento à compressão:

$$\hat{y}_{ic} = \frac{10,43 \times 3,97}{10,43 \cdot (\text{sen}(\alpha_i))^{2,35} + 3,97 \cdot (\text{cos}(\alpha_i))^{2,35}} ;$$

Para o ensaio de cisalhamento à torção, obteve-se a função:

$$\hat{y}_{it} = \frac{6,79 \times 5,20}{6,79 \cdot (\text{sen}(\alpha_i))^{2,19} + 5,20 \cdot (\text{cos}(\alpha_i))^{2,19}} .$$

Na Figura 21, é possível observar a curva juntamente com os pontos amostrais e os valores médios. Apesar do ajuste parecer adequado para ambos os ensaios, o coeficiente de determinação foi extremamente baixo para o ensaio de Torção (T), sendo que $R_C^2 = 0,756$ e $R_T^2 = 0,172$.

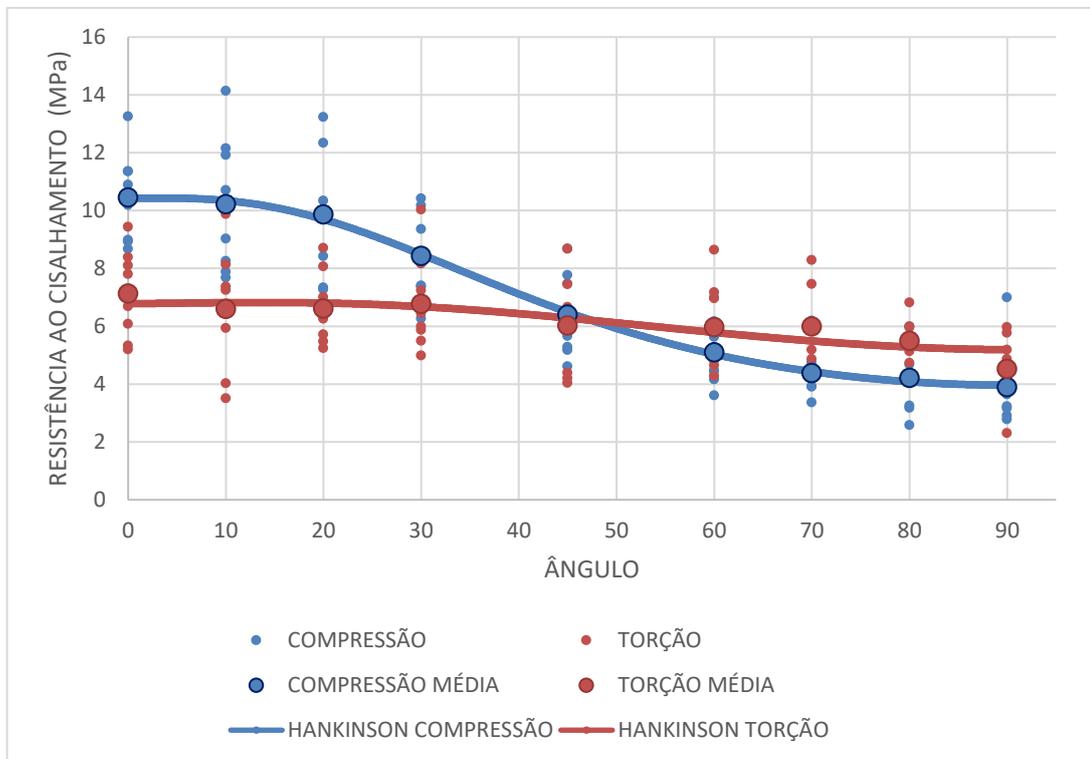


Figura 21 - Gráfico referente ao ajuste do modelo de Hankinson de acordo com o ensaio. Os pontos menores são os valores da resistência amostral e os maiores são a resistência média.

Fonte: autor, 2023.

Observe na Tabela 7 os coeficientes estimados no modelo de Hankinson, seus respectivos intervalos de confiança e os coeficientes de determinação.

Tabela 7: Coeficientes estimados no modelo de Hankinson e seus respectivos intervalos de confiança e coeficiente de determinação.

Ensaio	Parâmetros			
	$\widehat{f_{w0,j}}$	$\widehat{f_{w90,j}}$	\widehat{b}_j	R_j^2
C	10,43 [9,63; 11,26]	3,97 [3,43; 4,53]	2,35 [2,00; 2,71]	0,756
T	6,79 [6,08; 7,56]	5,20 [4,59; 5,85]	2,19 [1,74; 2,64]	0,172

A fórmula de *Hankinson* foi capaz de estimar os valores de resistência para o ensaio de cisalhamento à compressão, apresentando coeficiente de determinação da ordem de $R^2=0,756$. Este resultado evidencia a possibilidade de uso da fórmula como estimadora da resistência e apresentando coeficiente b em intervalo de confiança de [2,00; 2,71].

O coeficiente b representa a taxa de decaimento da resistência em relação à variação do ângulo, de modo que, quanto menor o coeficiente, mais rápido o decaimento da resistência. Dessa maneira, o coeficiente $b = 2$ sugerido pela NBR-7190 (2022) mostrou-se adequado, estando dentro dos valores encontrados no estudo.

Apesar de alguns ângulos não apresentarem diferença significativa entre os resultados médios de resistência ao cisalhamento à compressão e à torção, quando comparado às curvas de resistências geradas por toda a série de ângulos, fica evidente a diferença de resposta mecânica da junta frente ao tipo de ensaio.

Devido a complexidade dos esforços atuantes numa junta colada, não foi possível evidenciar a fórmula de *Hankinson* como estimadora da resistência ao cisalhamento à torção. Porém, ficou demonstrado que o ângulo de 90° apresentou os menores valores de resistência e, ainda, a curva apresentou características que sugerem queda da resistência com o aumento do ângulo.

Como consequência deste estudo parece que, quando for necessária a determinação da resistência de uma ligação colada, submetida ao esforço de torção, é recomendado o ensaio em laboratório com o ângulo desejado de projeto. Dessa maneira, é possível aproveitar de forma satisfatória as características resistivas, sem prejuízos oriundos de incertezas por estimativas. Contudo, a favor da segurança, parece recomendável, pelo menos, o ensaio de torção à 90°.

As curvas de resistência geradas assemelham-se as curvas obtidas pelos trabalhos de Petruski *et al.* (2020) e Couri Petruski *et al.* (2022). Os estudos desses

pesquisadores utilizaram madeira de eucalipto, gerando valores numéricos de resistência superior aos obtidos com a madeira de pinus. Porém, a tipologia da curva de resistência do cisalhamento à compressão e cisalhamento à torção apresentaram semelhança com obtido na presente pesquisa.

Por fim, parece ainda interessante destacar a diferença observada, de aproximadamente 30%, entre as resistências à compressão e à torção para juntas coladas a 0°. Como sabido, a colagem de juntas paralelas é aceita, por exemplo, pela NBR 7190 (ABNT, 2022). Contudo, dadas as evidências obtidas, em situações nas quais a ligação esteja sob momento de torção, a adoção de resultados do ensaio normatizado pode gerar riscos à segurança.

5 CONCLUSÕES

A variação do ângulo entre as fibras da madeira gera alterações na resistência ao cisalhamento da junta colada. Quanto maior o ângulo, menor a resistência obtida em ensaio normatizado, com ruptura por compressão.

A resistência ao cisalhamento à compressão pode ser estimada pela fórmula de Hankinson. Porém, a resistência ao cisalhamento à torção não pode ser estimada pela mesma fórmula.

Quando comparadas as curvas de resistências geradas por toda a série de ângulos, fica evidente a diferença de resposta mecânica da junta frente à tipologia do ensaio. Dessa maneira, o estudo apresentou indícios de disparidade de resistência ao cisalhamento de juntas coladas, quando a superfície colada está sujeita ao esforço de cisalhamento oriundo de força de compressão (esforço normal), em relação ao cisalhamento oriundo de esforço de flexão (momento torçor).

No contexto das evidências aqui obtidas, sugere-se o desenvolvimento de solução normativa que favoreça o dimensionamento estrutural de ligações coladas sujeitas ao esforço de momento torçor, com metodologia para obtenção da resistência de cisalhamento, assim como prescrição normativa para a colagem em ângulos.

Sugere-se igualmente o desenvolvimento de pesquisas semelhantes, utilizando diferentes espécies de madeiras e adesivos, para verificar a tendência de resposta mecânica das juntas coladas em relação às tensões atuantes no plano colado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES L. R.; CARRIELLO G. M.; PEGORARO G. M.; FILHO J. F.; **Utilização de óleos vegetais como fonte de polióis para a síntese de poliuretano: uma revisão**. 2021. *Disciplinarum Scientia. Série: Naturais e Tecnológicas*, v. 22, n. 1, p. 99-118, Santa Maria, 2021. DOI: 10.37779/nt.v22i1.3711

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - (ASTM) - D 905: **Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading**. Pennsylvania, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7190: **Projeto de Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 2022.

BARATA T. Q. F.; ANICETO P. A.; OLIVEIRA NETO L.; MBONA M. P. Sistema estrutural em madeira de reflorestamento para implantação de passarela modular em trilha ecológica no jardim botânico de Bauru, SP. *In: GONÇALVES F. G. Engenharia Industrial Madeireira: Tecnologia, Pesquisa e Tendências*. Guarujá: Editora Científica Digital, 2020, p. 343-364. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/livro-engenharia-industrial-madeireira-tecnologia-pesquisa-e-tendencias>

BIANCHE, J. J. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramaturas**. 2014. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG.

BIANCHE J. J.; TEIXEIRA A. P. M.; LADEIRA J. P. S.; CARNEIRO A. C. O.; CASTRO R V O.; LUCIA R. M. D.; **Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas**. 2017. *Floresta e Ambiente*; 24; DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.077114>

CARRASCO, E. V. M. **Ligações estruturais de madeira por adesivos**. 1984. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Universidade de São Paulo. São Carlos/SP.

CARRASCO, E. V. M.; BREMER, C. F.; MANTILLA, J. N. R. Avaliação do desempenho estrutural de paredes de madeira laminada colada. **Mix Sustentável**, v. 6, n. 3, p. 83-90, 2020.

COURI PETRAUSKI, S. M. F. **Desenvolvimento e teste de pórticos treliçados feitos de madeira de Eucalyptus citriodora e Eucalyptus grandis laminada e colada**. Viçosa, 1999. 129p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

COURI PETRAUSKI, S. M. F. **Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto, utilizando adesivos à base de resorcinol de óleo de mamona**. 2012. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG.

COURI PETRAUSKI, S. M. F. et al. **Analysis of eucalyptus glued-laminated timber porticos structural performance**. Rev. Árvore, Viçosa, v. 40, n. 5, p. 931-939, 2016.

COURI PETRAUSKI, S. M. F.; PETRAUSKI, M. C.; PETRAUSKI, A.; POSSA, D. C.; AZEVEDO, R. L.; PRIOR, M.; DIAS, G. L.. (2022), **Avaliação da fórmula de Hankinson como estimadora da resistência de juntas coladas sob compressão e desempenho mecânico de juntas coladas sob torção**. Research, Society and Development, v. 11, n. 14. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36464>.

DE PAULA, E. V. C. M. Ligação colada entre peças de madeira submetida a momento torçor na lâmina de cola. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 1. Anais. São Carlos: LaMEM-EESC-USP, 1983. V.2 33p.

DEMARZO, M. A.; PORTO, A. L. G.. Indicadores de Sustentabilidade (LCA) e Análise do Ciclo de Vida para Madeira de Reflorestamento na Construção Civil. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, [s. l.], ano 8, n. 21, Julho-Dezembro 2007. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/viewFile/204/pdf>. Acesso em: 28 dez. 2022.

FILIPPINI, D. F. **Construção e ensaio de pórticos em madeira colada com reforço nas ligações**. 2020. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2020.

GALEMBECK, F.; GANDUR, M. C. "Cientistas explicam o fenômeno da adesão". **Química e Derivados**. v. 393, p. 24-32. 2001.

GENT, A.N.; HAMED, G.R. **Handbook of Adhesives**. Irving Skeist, ed., Van Nostrand Reinhold Co. New York, NY. 3 ed. 1990.

GURGEL, D.; **Desenvolvimento de materiais poliméricos de poliuretano utilizando resíduos industriais e óleo de mamona**. 2019. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

IBÁ - **Indústria Brasileira de Árvores**. Relatório 2021. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 28 de setembro de 2022.

LOPES, M. S. M. **O Uso da Madeira na Construção Civil**. 8 de janeiro de 2019. Disponível: <https://matanativa.com.br/madeira-na-construcao-civil/>. Acesso em: 7 de fevereiro de 2023.

MARRA, G. G. **Technology of wood bonding: principles in practice**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 454 p.

MENDOZA Z. M. S. H; BORGES P. H. M.; RIBEIRO A. S.; FERNANDES F. B.; **Aspectos gerais sobre adesivos para madeira**; Multitemas, Campo Grande, MS, v. 22, n. 51, p. 49-68, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.20435/multi.v22i51.1412>

PETRAUSKI A., COURI PETRAUSKI S. M. F., DELLA LUCIA R. M. & PETRAUSKI M. C. (2020). **Methodology and device to obtain torsional shear strength of glued joints**. *Floresta*: 50 (4): 1921-1930. DOI: 10.5380/ufv.v50i4.67140

PETRAUSKI, A. **Comportamento de ligações adesivas e avaliação experimental de tesouras de telhados feitas de laminado colado com madeira de *Eucalyptus grandis***. Viçosa, 2000. 128 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

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

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.). **Handbook of adhesive technology**. New York: M. Dekker, 1994.

POSSA D. C.; PETRAUSKI A.; COURI PETRAUSKI S. M. F.; SAVARIS G.; JORDAN R. A.; AZEVEDO R. L.; POSSA D. C.; PADILHA V. H. L.; TOMÉ K. T.; PETRAUSKI M. C.; LA TORRE A. III E. (2022). **Construção e ensaio de pórticos com tirante em madeira laminada colada**. *Research, Society and Development*. 20 (2): e52711226109. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.26109

ROSA, A. F. B. **Caracterização do comportamento das ligações coladas em estruturas de madeira: Estudo da influência da temperatura**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa/Portuga

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. **Theories and mechanisms of adhesion**. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.). *Handbook of adhesive technology*. New York: M. Dekker, 1994. p.19-32

SEGUNDINHO, P. G. A.; OLIVEIRA, R. G. E.; GONÇALVES, F. G.; LOPES, N. F.; ALVES, R. C.; AZEVEDO, M. S. Avaliação da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada. **Revista Matéria**, v. 26, n. 3, 2021.

SILVA D. A.; MÜLLER B. V.; KUIASKI E. C.; ELOY E.; BEHLING A.; COLAÇO C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SILVA S A; **Síntese e caracterização de poliuretanos - espumas flexíveis puras e compósitos a partir de polióis à base de óleo de milho: e adesivos à base de derivados de óleo de rícino**. 2014. 207f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

STRINGARI E. H., Petrauski A., Couri Petrauski S. M. F., Azevedo R. L. & Savaris G. (2020). **Construction and testing of glued laminated timber frames for use in laying poultry houses**. *Engenharia Agrícola*: 40 (2): 122-131. DOI: doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p122-131/2020

STRINGARI, E. H. **Construção e ensaio de pórticos em madeira laminada colada visando emprego em aviários de postura**. 2019. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

SUSAETA A., ADAMS D. C., GONZALEZ-BENECKE C. Economic vulnerability of southern US slash pine forests to climate change. **Journal of Forest Economics**, v. 28, n. 1, p. 18-32, 2017.

SZUCKS, C. A. **Estruturas de madeira**. 2015. 5ª ed, Departamento de engenharia civil - Centro tecnológico- Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC.

TAM V. W. Y., TAM C. M., ZENG S. X., NG WCY. Towards adoption of prefabrication in construction. **Building and Environment**, v. 42, p. 3642-3654, 2007.

TIENNE, D. L. C. **Qualidade da adesão de juntas coladas expostas a condições de serviço externo e interno**. 2006. 68f. Dissertação (Mestre em Ciências no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais) - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO, Seropédica, RJ.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Equipe de Desenvolvimento Web/UFV (ed.). Salve as Florestas: O Papel das Florestas no Ciclo do Carbono. *In: O Papel das Florestas no Ciclo do Carbono*. [S. l.], 2014. Disponível em: https://www.salveasflorestas.ufv.br/?page_id=284. Acesso em: 28 dez. 2022.