

ALVARO BEGNINI DE MELLO

**SIGNIFICÂNCIA DOS FATORES ÂNGULO E ENSAIO NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DO PINUS COLADO COM EPÓXI**

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
OUTUBRO-2024

ALVARO BEGNINI DE MELLO

**SIGNIFICÂNCIA DOS FATORES ÂNGULO E ENSAIO NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DO PINUS COLADO COM EPÓXI**

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: Dr. Alfredo Petruski.

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
OUTUBRO – 2024

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

Begnini de Mello, Alvaro
SIGNIFICÂNCIA DOS FATORES ÂNGULO E ENSAIO NA RESISTÊNCIA
AO CISALHAMENTO DO PINUS COLADO COM EPÓXI / Alvaro Begnini de
Mello; orientador Alfredo Petruski; coorientador Mateus
Petruski. -- Cascavel, 2024.
41 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, 2024.

1. Madeira. 2. Adesivos. 3. Equação de Hankinson. 4.
Desempenho mecânico. I. Petruski, Alfredo, orient. II.
Petruski, Mateus, coorient. III. Título.

ALVARO BEGNINI DE MELLO

"Significância dos fatores ângulo e ensaio na resistência ao cisalhamento do Pinus colado com epóxi"

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:

Documento assinado digitalmente
 ALFREDO PETRAUSKI
Data: 29/10/2024 09:05:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador - Alfredo Petruski

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

Documento assinado digitalmente
 MATEUS COURI PETRAUSKI
Data: 29/10/2024 10:41:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mateus Couri Petruski

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

Documento assinado digitalmente
 RICARDO LESSA AZEVEDO
Data: 31/10/2024 17:40:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ricardo Lessa Azevedo

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

Documento assinado digitalmente
 ALESSANDRA DOS SANTOS
Data: 31/10/2024 09:13:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alessandra dos Santos

Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG)

Cascavel, 25 de outubro de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família pelo apoio em momentos de necessidade, ao meu orientador Alfredo Petruski e co-orientador Mateus Petruski que auxiliaram em todas as etapas deste trabalho, à professora Alessandra dos Santos que contribuiu enormemente para as análises estatísticas, aos meus amigos e colegas do programa que forneceram ajuda ao longo da pesquisa.

Por fim, agradeço a todos os professores do PPGEA à Capes pela bolsa fornecida, contribuindo para o meu aprendizado durante esses dois anos.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios de densidade aparente após a classificação das peças....	17
Tabela 2 - Médias das resistências e variabilidade observada, por ângulo e ensaio conduzido.....	25
Tabela 3 - Resumo ANOVA para os resultados do experimento.....	26
Tabela 4 - Resumo ANOVA dado o fator ângulo dentro do ensaio.....	27
Tabela 5 - Resultado médio das resistências segundo teste Tukey, á 5% de significância.....	27
Tabela 6 - Resumo ANOVA dado o fator ensaio dentro do ângulo.....	28
Tabela 7 - Parâmetros estimados para o modelo de Hankinson juntamente com o intervalo de confiança de 95% nos dois ensaios.....	29
Tabela 8 - Resistências médias das juntas coladas para os três adesivos distintos, sob compressão, com o resultado do teste de Tukey a 5% de significância.....	31
Tabela 9 - Resistência das juntas coladas para os três adesivos, torção.....	34
Tabela 10 - Comparativo para diferenças entre os ensaios	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Ranking dos maiores emissores globais de GEE em 2020, incluindo inventários sobre o setor de LULUCF.....	04
Figura 02. Ranking global de emissões de GEE per capita.....	05
Figura 03. Histórico da distribuição de área plantada no Brasil por espécie (2015 – 2023)	06
Figura 04. Área plantada no Brasil por espécie em 2023.....	07
Figura 05. Distribuição de área plantada por região em 2023.....	08
Figura 06. Participação da cadeia produtiva florestal no PIB em comparação com outros setores da economia nos últimos dez anos.....	09
Figura 07. Ligação colada (A), e sua aplicação em pórtico (B).....	11
Figura 08. Projetos realizados a partir de MLC.....	12
Figura 09. Fórmula geral do anel de epóxi.....	13
Figura 10. Epicloridrina.....	13
Figura 11. Extração e colagem dos corpos de prova.....	18
Figura 12. adesivo espalhado em uma das faces da madeira.....	19
Figura 13. Aparato de prensagem com as lâminas coladas.....	20
Figura 14. Corpos de prova para os ensaios.....	20
Figura 15. Corpos de prova dispostos nas máquinas de ensaio utilizadas.....	22
Figura 16. Distribuição de tensões para os ensaios realizados.....	22
Figura 17. Valores experimentais e curvas geradas pela equação de Hankinson ajustada.....	30
Figura 18. Equações de Hankinson plotadas para as pesquisas conduzidas, ensaios sob compressão.....	33
Figura 19. Resistências sob torção para os três adesivos usados.....	35

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01. Equação de Hankinson.....	02
Equação 02. Resistência ao cisalhamento à compressão.....	21
Equação 03. Resistência ao cisalhamento sob torção.....	21
Equação 04. Modelo de análise estatística.....	23
Equação 05. Modelo estatístico de regressão.....	24

MELLO, Alvaro Begnini; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Outubro de 2024.
Significância dos fatores ângulo e ensaio na resistência ao cisalhamento do Pinus colado com epóxi. Orientador: Dr. Alfredo Petrauski.

RESUMO

Dentre os sistemas construtivos existentes, a Madeira Lamelada Colada – MLC entra em destaque como produto estrutural. Neste método, lamelas de madeira selecionadas são dispostas de maneira a terem suas fibras alinhadas de forma paralela e são unidas por meio de adesivos. O adesivo epóxi é um polímero termofixo formulado à base de resina que pode ser utilizado na união de vários materiais na construção civil. Nesse contexto, avaliou-se nesta pesquisa a resistência de juntas coladas com adesivo epóxi utilizando madeira *Pinus sp*, para diferentes ângulos. As juntas foram confeccionadas formando ângulos de 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° e 90°, sendo submetidas a ensaios de cisalhamento à compressão e à torção. Partindo da análise de regressão, a equação de Hankinson se apresentou apta para estimar as resistências ao cisalhamento sob compressão, retornando um coeficiente de determinação de 0,89. Já para cisalhamento à torção o modelo não se mostrou eficaz, com baixo R². Os corpos de prova que foram submetidos à ensaio sob compressão apresentaram resposta mecânica distinta daqueles submetidos sob torção.

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

PALAVRAS-CHAVE: Madeira; Adesivos; Equação de Hankinson; Desempenho mecânico.

MELLO, Alvaro Begnini; State University of Western Paraná, October 2024. **Significance of Angle and Test Factors on the Shear Strength of Epoxy-Bonded Pine.** Supervisor: Dr. Alfredo Petruski.

ABSTRACT

Among the existing construction systems, Glued Laminated Timber (GLT) stands out as a structural product. In this method, selected wood laminations are arranged so that their fibers are aligned parallel and are bonded using adhesives. Epoxy adhesive is a thermosetting polymer formulated from resin, which can be used for bonding various materials in civil construction. In this context, this research evaluated the shear strength of joints bonded with epoxy adhesive using Pine wood at different angles. The joints were created at angles of 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80°, and 90°, and were subjected to shear tests under compression and torsion. Based on regression analysis, the Hankinson formula proved suitable for estimating shear strength under compression, returning a coefficient of determination of 0.89. However, for shear under torsion, the model was not effective, with a low R² value. The test specimens subjected to compression exhibited a distinct mechanical response compared to those subjected to torsion.

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

KEYWORDS: Wood; adhesives; Hankinson equation; Mechanical performance.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 BREVE PANORAMA DO SETOR FLORESTAL NO BRASIL.....	4
2.2 MADEIRA LAMELADA COLADA - MLC.....	09
2.3 ADESIVOS À BASE DE RESINA EPÓXI.....	12
2.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE JUNTAS COLADAS EM ÂNGULOS DIFERENTES.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 MATERIAIS.....	16
3.2 CARACTERIZAÇÃO.....	17
3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	17
3.4 ENSAIO.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	25
4.2 DESEMPENHO DOS TRÊS ADESIVOS USADOS PARA O LOTE DE MADEIRA.....	30
5. CONCLUSÃO	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

Sendo um material complexo, a madeira possui origem biológica e tem elevada variabilidade das suas propriedades (BRAZ *et al.*, 2013). Por consequência da sua natureza fisiológica assim como seu arranjo celular, a madeira tem características anisotrópicas e também é considerada ortotrópica pelo fato de apresentar propriedades mecânicas diferentes dependendo da direção em que um esforço é aplicado em relação as suas fibras (CEZARO *et al.*, 2016; LONGSTON *et al.*, 2014). Deste modo, objetivando aumentar o conhecimento a respeito do potencial de utilização da madeira, se faz necessário o estudo das suas propriedades, proporcionando adequações para diversas aplicações e utilidades possíveis (BRAZ *et al.*, 2013). A ideia se aplica, também às propriedades de adesão.

Os sistemas construtivos em madeira, conforme definido por Cunha e César (2004), referem-se à organização de componentes, elementos e subsistemas, dispostos de maneira a formar uma estrutura destinada a abrigar diferentes atividades humanas. Dentre esses sistemas, destaca-se a Madeira Lamelada Colada (MLC), considerada um produto estrutural. Nesse método construtivo, num processo industrial, lamelas selecionadas são sobrepostas de maneira paralela, unidas por meio de adesivos e o conjunto recebe pressões, geralmente entre 0,7 e 1,5 MPa (PFEIL E PFEIL, 2003).

No contexto da aplicação estrutural, as ligações coladas precisam proporcionar resistências próximas às da madeira maciça. Isso é essencial para permitir a transferência eficiente das tensões, dessa forma é assegurando um bom desempenho da ligação (SEGUNDINHO *et al.*, 2021). Ao analisar as tensões envolvidas, as ligações coladas são avaliadas com base nas tensões de cisalhamento no plano de colagem. As ligações podem estar sujeitas a tensões de cisalhamento devido a forças normais e cortantes, e aquelas causadas por momentos, tecnicamente momentos de torção no caso desta pesquisa. Todos esses tipos de tensões cisalhantes podem agir ao mesmo tempo sobre a ligação, sendo consideradas no dimensionamento (PETRAUSKI *et al.*, 2020; STRINGARI *et al.*, 2020; POSSA *et al.*, 2022).

Ressalta-se ainda que a resistência de juntas coladas em cisalhamento à compressão pode ser diferente quando comparada à resistência de juntas à torção (COURI PETRAUSKI, *et al.*, 2022).

Para estimar as propriedades de resistência da madeira quando esta recebe forças inclinadas em relação à direção das suas fibras, haja vista, por exemplo o recomendado pela ABNT NBR 7190:2022, pode-se usar a equação de Hankinson, conforme equação (1). Alguns pesquisadores também recomendam o uso da mesma em ligações por adesivos.

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot (\text{seno}(\alpha))^{\beta} + f_{90} \cdot (\text{cos}(\alpha))^{\beta}} \quad (1)$$

Na qual:

f_{α} = estimativa da resistência da madeira quando a solicitação forma um ângulo α com as fibras (MPa);

f_0 = estimativa da análise de regressão, da resistência ao cisalhamento do plano colado para solicitação paralela (MPa); ou seja $\alpha = 0^{\circ}$.

f_{90} = estimativa da análise de regressão, da resistência do plano colado para solicitação perpendicular (MPa); ou seja $\alpha = 90^{\circ}$.

α = é o ângulo entre a direção das fibras da madeira e a direção da solicitação (Graus);

β = é o coeficiente do expoente dos seno e cosseno da equação.

Couri Petruski (2012) desenvolveu e testou pórticos de MLC de Eucalipto, utilizando adesivos com base em resorcinol formaldeído e óleo de mamona. Na pesquisa, cinco pórticos retos triarticulados em escala real foram submetidos a testes de carga, sendo dois pórticos confeccionados com adesivo à base de óleo de mamona e três pórticos utilizando resorcinol formaldeído. No experimento realizado a autora concluiu que a equação de Hankinson mostrou-se válida na predição da resistência das juntas coladas, para ambos os adesivos.

Padilha *et al.* (2023) avaliaram a resistência de juntas de madeira *Pinus sp* coladas em diversos ângulos com adesivo poliuretano feito a partir de óleos vegetais.

As juntas foram submetidas a ensaios de cisalhamento sob compressão e sob torção. Ao submeter os valores de resistência a uma análise de regressão, a curva obtida apresentou compatibilidade com a equação de Hankinson para os ensaios à compressão. Ainda observou-se que as resistências são diferentes ao comparar o ensaio de compressão com o de torção.

Possa *et al.* (2024) avaliaram a resistência de juntas coladas em diversos ângulos de madeira *Pinus sp*, usando adesivo poliuretano monocomponente, 1C-PUR. Na pesquisa, os corpos confeccionados foram ensaiados ao cisalhamento à compressão e sob torção. Avaliando a equação de Hankinson, o modelo mostrou-se adequado para estimar as resistências à compressão.

Destaca-se que Padilha *et al.* (2023) e Possa *et al.* (2024) , utilizaram o mesmo lote de madeira que, inclusive, foi o lote de madeira usado nesta pesquisa. Entretanto, as três pesquisas, com objetivos similares, foram realizadas com adesivos diferentes. No presente trabalho utilizou-se o adesivo à base de resina epóxi e, portanto, considerando objetivos comuns, admitiu-se as seguintes hipóteses iniciais:

- admitir que, independentemente do adesivo ou a madeira usados, a equação de Hankinson estima os valores de resistência para juntas coladas à diferentes ângulos;
- admitir que, independentemente do adesivo ou a madeira usados, as resistências ao cisalhamento sob compressão diferem das resistências ao cisalhamento na torção.

O objetivo geral da pesquisa consiste na avaliação do desempenho mecânico de juntas coladas com adesivo epóxi.

Os objetivos específicos do trabalho, envolveram os seguintes aspectos:

- Avaliar a resistência de cisalhamento sob compressão e sob torção de juntas de madeira *Pinus sp*, coladas com adesivo epóxi em diferentes ângulos entre as fibras,
- Confrontar os valores de resistência à compressão com os valores de resistência sob torção, analisando possíveis diferenças para cada tipo de ensaio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE PANORAMA DO SETOR FLORESTAL NO BRASIL

O Painel Intergovernamental sobre mudanças Climáticas (IPCC), cita que as consequências do aquecimento global provocado pelas emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera irá impactar de modo preocupante ao longo dos próximos séculos, atingindo todo o sistema climático do planeta, de modo a atingir a segurança dos humanos e demais espécies (IPCC, 2018). Com o aumento da temperatura global, há um crescente número de secas e inundações com prejuízo da segurança alimentar, e também pode haver redução na disponibilidade e qualidade de água potável, o que favorece a proliferação de doenças. Ainda ressalta-se os impactos adversos na saúde física e mental das pessoas, como o aumento na frequência de doenças respiratórias, proliferação de vírus e mortalidade por eventos climáticos extremos (IPCC, 2022).

Apesar do Brasil ser considerado um país emergente por suas vias de desenvolvimento, é o sétimo maior emissor global de GEE (UNEP, 2022) conforme ilustra a Figura 01. Considerando os índices de emissão percapita, o mesmo sobe para quarta posição, ficando atrás apenas das maiores potências como EUA, Rússia e China, conforme mostra a Figura 02. No entanto, diferentemente dos países que lideram o ranking, a grande parte de emissão de GEE do Brasil não provém da queima de combustíveis fósseis e sim dos altos índices de desmatamento e da frequente ocorrência de queimadas (Land Use, Land-Use Change and Forestry - LULUCF, 2020).

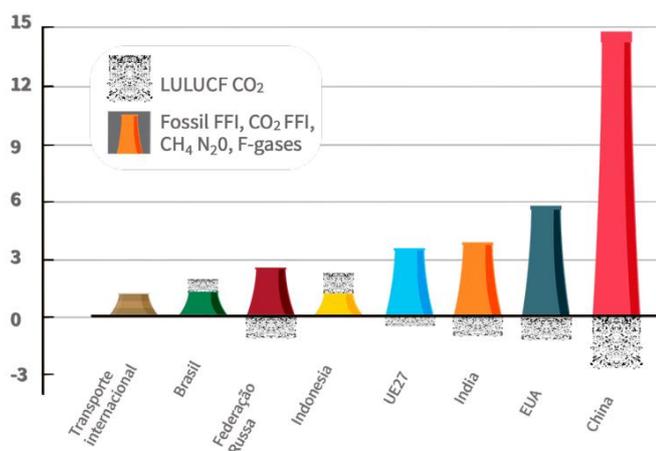


Figura 1 - Ranking dos maiores emissores globais de GEE em 2020, incluindo inventários sobre o setor de LULUCF (unidades em GtCO₂e).

Fonte: UNEP (2022).

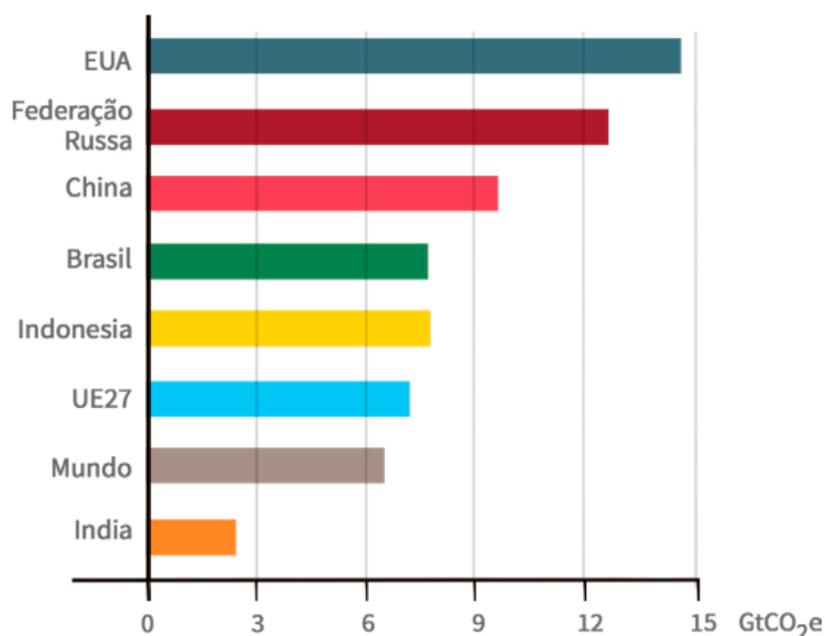


Figura 2 - Ranking global de emissões de GEE per capita.

Fonte: UNEP (2022).

O desmatamento de florestas na Amazônia alcançou um novo patamar entre os anos de 2019 a 2021, ultrapassando 10 mil km² ao ano, sendo 56,60% maior que a média dos anos de 2016 a 2018 (ALENCAR *et al*, 2022). Desse modo faz necessário a implementação da sustentabilidade, principalmente no setor da construção, onde a exploração e os danos podem ser controlados com a criação de métodos construtivos eficientes e ecologicamente corretos (ARAUJO, 2012).

Uma relação satisfatória entre homem e ambiente no contexto de construções sustentáveis, pode ser alcançada através da aplicação dos conhecimentos teóricos mais atuais e práticas já consolidadas, escolhendo os recursos construtivos naturais, a partir da avaliação do consumo energético, impacto ambiental e aspectos culturais envolvidos (MADEIREIRA MADECAL, 2014). Todas essas necessidades podem ser contempladas pela utilização da madeira, um material disponível em abundância, renovável, fixador de carbono e presente no cotidiano de inúmeras comunidades. (ARAUJO, 2012).

A madeira proveniente de reflorestamento, segundo Verdélio (2017) tem se mostrado crescente objeto de interesse em detrimento daquelas extraídas em

florestas naturais, sendo que sua promoção como material de construção acarreta em pontos positivos com a possibilidade de renovação, diminuindo a pressão sobre os recursos não renováveis, além de contribuir na absorção de gás carbônico (JHON, 2000).

No contexto nacional, a indústria de árvores cultivadas se mantém em ascensão constante e desempenha um papel crucial ao promover a bioeconomia no mercado interno e externo. Segundo o relatório anual do IBÁ (2024), no ano de 2023 o valor bruto do setor de árvores cultivadas alcançou a marca de R\$ 202,6 bilhões, e apresentou um crescimento anual composto de 3,2% nos últimos dez anos, ainda ressalta-se a representatividade da cadeia produtiva florestal no PIB, que foi de 0,9%.

Conforme informado pelo relatório, pela primeira vez, foi superada a marca de 10 milhões de hectares de árvores cultivadas, um crescimento de 3% em relação ao ano anterior. Dentre os tipos de plantios, se destaca o eucalipto, abrangendo 7,8 milhões de hectares, correspondendo a 76% da área plantada, e representando crescimento de 41% na última década. Este panorama evidencia a crescente importância do reflorestamento para a economia brasileira. A figura 3 apresenta as áreas de cultivo ao longo dos anos de 2015 a 2023.

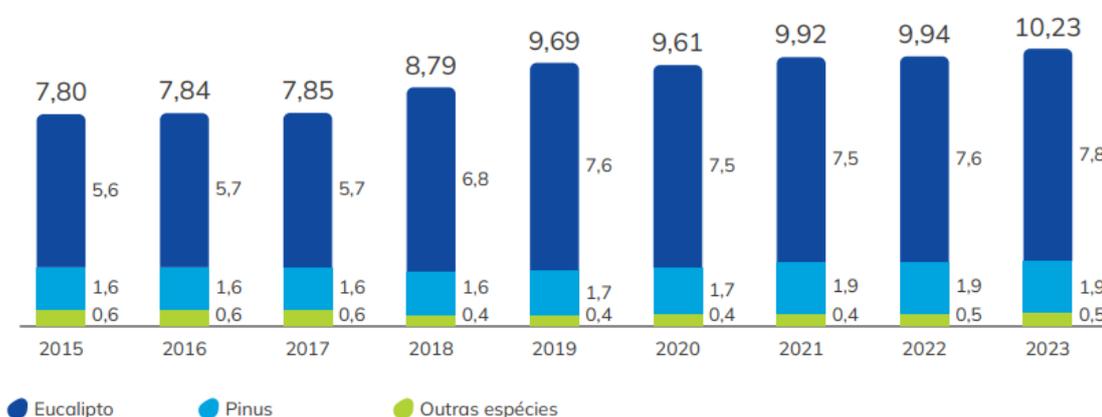


Figura 3 - Histórico da distribuição de área plantada no Brasil por espécie (2015 – 2023) [Milhões de hectares].

Fonte: IBÁ (2024).

Conforme apresentado na Figura 4, as áreas de Pinus cobrem atualmente 1,9 milhão de hectares, o que corresponde a 19% do total do setor e, além disso, outras espécies como acácia, teca, seringueira e araucária ocupam cerca de 500 mil

hectares.

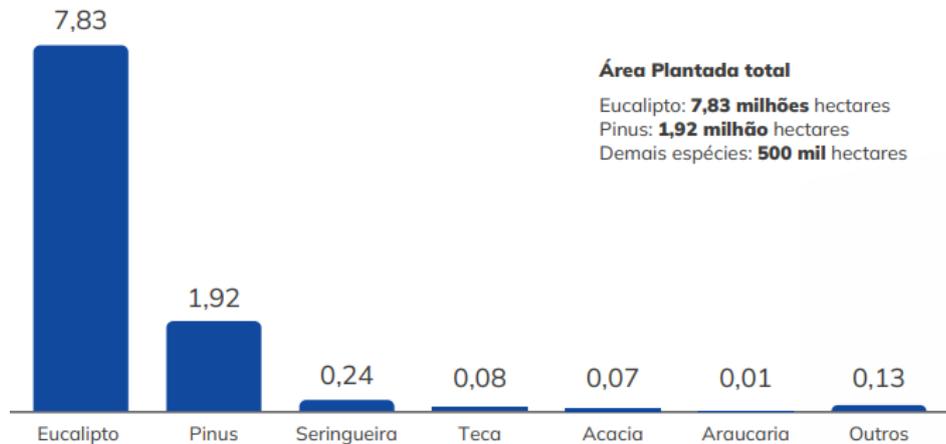


Figura 4 - Área plantada no Brasil por espécie em 2023 [Milhões de hectares].

Fonte: IBÁ (2024).

No que diz respeito a distribuição dos plantios florestais pelo território brasileiro, os principais estados são Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, os quais somam 69 % de área plantada no país (IBÁ, 2024). Conforme ilustra a Figura 5a, os plantios para eucalipto estão concentrados na região Sudeste, a qual abriga 44% do total do país, contando com 3,5 milhões de hectares. Para o Pinus, a região Sul é predominante, correspondendo a 89% da área total de plantio, sendo o estado de Santa Catarina o líder neste cultivo, conforme apresenta a Figura 5b.



Figura 5a - Distribuição de área plantada por região em 2023 [%], eucalipto.

Fonte: IBÁ (2024).



Figura 5b - Distribuição de área plantada por região em 2023 [%], pinus.

Fonte: IBÁ (2024).

A produtividade de eucalipto no Brasil, foi estimada em 33,7 m³/ha/ano (com casca), sendo a idade média de 7,2 anos. Já a produtividade de Pinus, foi estimada em 30,80 m³/ha/ano (com casca), com uma idade média de 14,7 anos (IBÁ, 2014). Ao avaliar os segmentos das atividades setoriais do Brasil, o setor da indústria de plantio de árvores para fim industrial superou a de máquinas e equipamentos em 1,2%. A Figura 6 mostra o ranking das principais atividades que participam no PIB nacional, sendo elas a construção civil, eletricidade, gás, água, esgoto e limpeza urbana, alimentos e bebidas e petróleo.

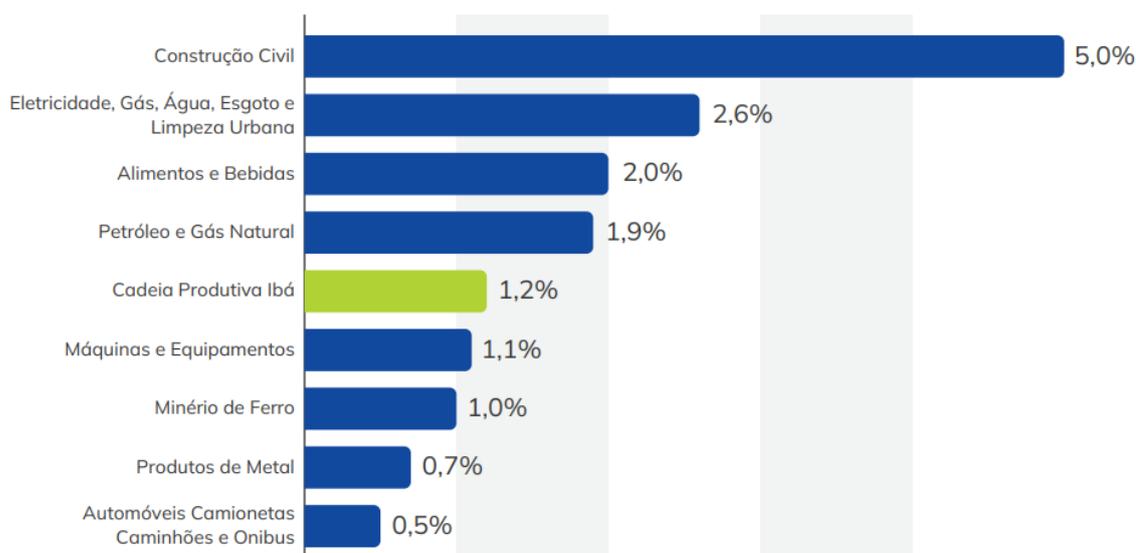


Figura 6 - Participação da cadeia produtiva florestal no PIB em comparação com outros setores da economia nos últimos dez anos, (2014 – 2024).

Fonte: IBÁ (2024).

Conforme apresentado na Figura 6, a construção civil lidera o ranking de participação do PIB nacional, mostrando o quanto relevante é o setor para a economia nacional. Dentre os papéis da madeira no setor, essa pode ser usada de forma secundária como uso para escoramentos, formas, esquadrias, andaimes e barracões. Já na forma permanente, a madeira é utilizada como revestimento, mobiliário, cobertura e fundações (JUNIOR *et. al*, 2017). Segundo Zenid (2009), os principais compostos da madeira existentes no mercado brasileiro são de madeira roliça, madeira serrada, pranchas e pranchões, vigas, vigotas, tábuas, caibros, forro, batente, madeiras laminadas, compensados, chapas de fibra, chapas de partículas e madeira estrutural.

2.2 MADEIRA LAMELADA COLADA – MLC

Segundo Calil, (2010) a MLC pode ser empregada sob as mais variadas formas estruturais, e consiste em um produto que requer precisão de fabricação em todas as suas etapas, alguns fatores como espécie de madeira, espessura, posições das lâminas e tipo de adesivo podem afetar significativamente a resistência mecânica para a qual as peças foram projetadas. Autores como Kretschmann (2010) e Evans *et al.* (2000) relacionam as características naturais da madeira com a resistência mecânica, ressaltando que a densidade também é um fator que afeta suas propriedades.

Uma Pesquisa realizada por Abruzzi *et al.* (2012), apresentou correlações obtidas entre propriedades mecânicas, densidade e o estado de deterioração de postes de eucalipto, que foram retirados da rede elétrica em diferentes estados de deterioração e ensaiados à flexão. O estudo indicou que madeiras menos densas apresentaram baixa resistência mecânica residual, mesmo sem apresentar sinais de deterioração. Stringari *et al.* (2020), confeccionou pórticos a partir de tábuas coladas de Araucária no qual foram coladas com adesivo poliuretano, este a base de óleos vegetais. Na pesquisa os autores avaliaram o comportamento estrutural dos pórticos submetendo-os a testes de carga. Cinco pórticos de densidades diferentes foram construídos, com valores de massa que variaram de 27,20 kg a 31,80 kg. Consideradas as forças de ruptura indicadas, houve correlação de 0,82 entre as massas e as resistências.

Possa *et al.* (2022) avaliaram o desempenho da estrutura de quatro pórticos atirantados, em escala reduzida, produzidos em MLC de *Pinus sp.* No estudo, obteve-se a correlação positiva entre a densidade aparente da madeira dos pórticos com sua resistência, com um coeficiente de correlação de 0,90.

Quanto a sua resistência estrutural, uma junta de MLC pode estar submetida a vários esforços mecânicos simultaneamente. Petruski *et al.* (2020) destacam que, ao romper uma junta no cisalhamento sob compressão, o ângulo de colagem entre as fibras exerce uma forte influência na sua resistência. Adicionalmente, os autores afirmam que, quando a junta é rompida a partir de um momento de torção, ou momento fletor na barra (M), a resistência se torna pouco sensível ao ângulo de colagem sendo diferente da resistência motivada por forças (normais ou de cisalhamento).. Na Figura 7 ilustra-se os esforços atuantes em uma ligação de madeira colada em um nó do pórtico plano.

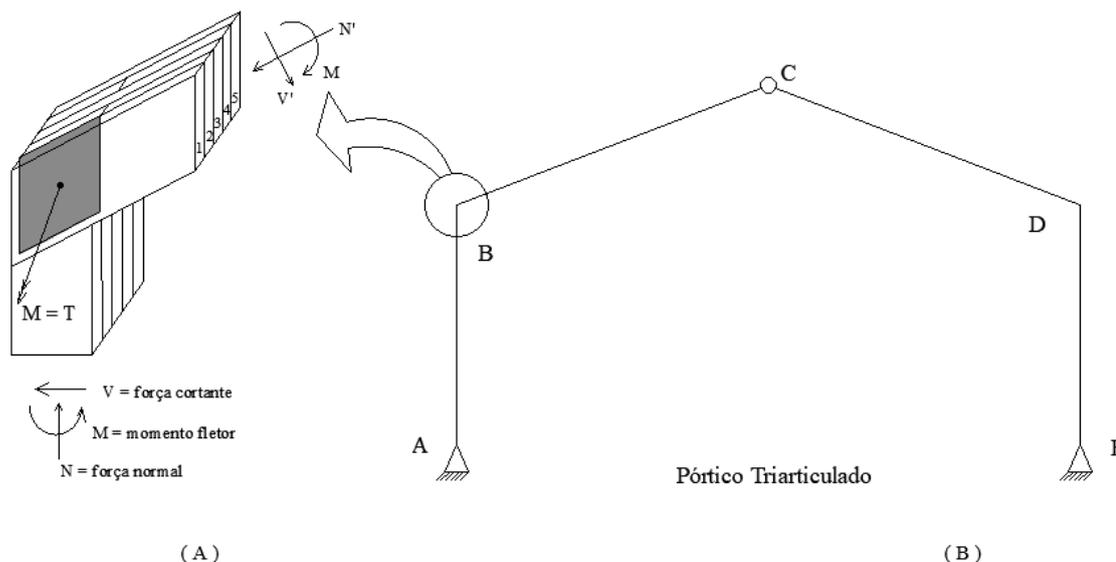


Figura 7 – Ligação colada (A), e sua aplicação em pórtico (B).

Fonte: PETRAUSKI *et al.*, (2020)

Relacionado à novas tecnologias envolvendo o uso de madeira, a pré fabricação de elementos com a matéria prima vem permitindo uma realização mais eficaz de projetos, que até então seriam de difícil execução em comparação a outros materiais (ANAGNOSTOU, 2018). A MLC é o sistema proveniente da pré-fabricação mais comum e presente no Brasil, tendo suas primeiras aplicações em meados dos anos 1960 (CAMARGO, 2024), Esse é utilizado em elementos aporticados, pilares e vigas, variando suas dimensões e comprimentos, oferecendo mais opções arquitetônicas.

Pesquisas realizadas sobre a aplicação estrutural de MLC, vêm sendo difundidas ao longo dos anos. Por exemplo, em um estudo realizado pelos autores Souto e Wandscheer (2018), foi desenvolvido um projeto fictício de um edifício de sete pavimentos para uso comercial, dimensionado exclusivamente com MLC. Analisando a viabilidade do projeto, os autores concluíram que as normas técnicas nacionais e internacionais permitiram desenvolver um processo sequenciado, facilitando o dimensionamento dos elementos, sendo possível a substituição de elementos maiores e mais pesados, otimizando o comportamento estrutural, durabilidade e custos associados ao ciclo de vida da estrutura.

Além disso, é possível encontrar projetos de grande porte utilizando o MLC, que vêm sendo realizados no mundo todo, podendo ser apresentados como exemplo

(COSTA, 2013):

- Brock Commons Tallwood House com 18 pavimentos em Vancouver no Canadá,(Fig. 8.a).
- HoHo com 24 pavimentos em Viena na Áustria ainda em planejamento (Fig. 8.b).;
- Haut com 21 pavimentos em Amsterdam na Holanda (Fig. 8.c).



(a)

(b)

(c)

Figura 8 (adaptada) – Projetos realizados a partir de MLC.

Fonte: Acton Ostry, A3Z0, Linders Jannes (2017,2016,204)

2.3 ADESIVOS À BASE DE RESINA EPÓXI

A resina epóxi é um polímero termofixo, que apresenta alta resistência mecânica, baixa retração e alta adesão a diferentes substratos (BOYLE, MARTIN e NEUNER, 2021). Após um processo de cura que consiste na reação entre os anéis epóxi e outros compostos químicos, suas propriedades surgem, formando ligações cruzadas e um sistema tridimensional, deixando de ser um líquido viscoso, passando a se tornar um sólido vítreo (MENEZES *et al.*, 2004). A Figura 9 ilustra a estrutura do anel epóxi, constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono.

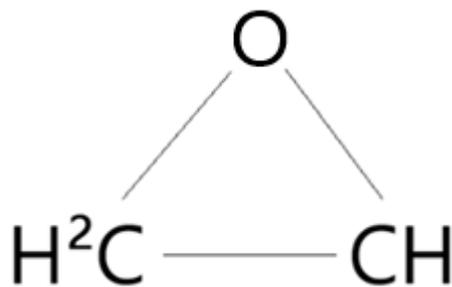


Figura 9 – Fórmula geral do anel de epóxi.

Fonte: dow.com (2005).

A mistura realizada de um diol (Bisfenol A ou F) com um alto peso molecular e a epícloridrina, é um exemplo de reação química na qual se resulta a resina epóxi (Almeida *et. al*, 2016). A Figura 10, ilustra uma molécula de epícloridrina, na qual é possível observar o anel de epóxi dentro de sua estrutura.

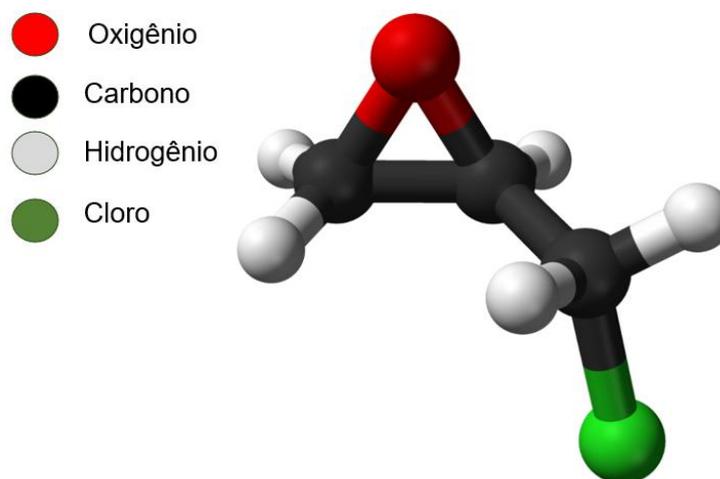


Figura 10 – Epícloridrina.

Fonte: Adaptado de Coelho, T. C. (2006).

Os materiais utilizados como adesivos a base de epóxi serão então formados a partir da união de dois componentes, a resina epóxi e o endurecedor, sendo amplamente utilizados em diversas áreas, como a construção civil, montagem eletrônica, produção de automóveis, mercado naval e aeroespacial (CHEN, *et al.*,

2019). Por possuir uma estrutura química reticulada forte e rígida, se torna adequado para aplicações de colagem estrutural (KUMAR, *et al.*, 2013). A medida em que se altera o processo de cura como proporção resina/endurecedor, tempo e temperatura de preparo, diversos sistemas epóxi podem ser obtidos, com diferentes características mecânicas e físicas (AMARAL *et al.*, 2013).

De acordo com a temperatura de cura, os agentes dos adesivos epóxi podem ser divididos em aminas, anidros ácidos, resinas sintéticas e agentes latentes por diferentes componentes químicos. Para a cura em temperatura ambiente, os agentes por aminas são os mais usados (ZHAO JL, 2002) e podem ser principalmente as poliamidas, amidas alifáticas e aminas alicíclicas nas quais em aplicações industriais são frequentemente utilizados (YIN, 2016). Outros agentes como polimercaptanas e os de última geração como poliaminoamida são tradicionais no meio comercial, e apresentam alta reatividade e resistência química (ROMÃO *et al.*, 2003). Segundo Zhang (2022), devido a necessidade de expandir seu escopo de aplicação, os adesivos a base de resina epóxi podem ser modificados para aplicações distintas. Existem várias formas de melhorar as propriedades físicas do adesivo e uma delas é a adição de um material de enchimento à matriz epoxí para obter compósitos, a qual pode oferecer à solução um aperfeiçoamento nas propriedades mecânicas. (FINK, 2017)

Existem diversas pesquisas realizadas com adesivos epóxi, sendo utilizadas diferentes composições em várias aplicações. Um estudo feito por De Souza Santos *et al.* (2019), avaliou a região de fratura de três tipos de juntas de madeira colada, sendo juntas biseladas, encaixadas e sobrepostas na qual utilizou o adesivo a base de resina epóxi denominado comercialmente como Araldite profissional. Esse é composto pela resina epóxi Bisfenol A e seu reagente endurecedor a base de trietilenotetramina. Segundo o fabricante, este adesivo possui uma viscosidade de 45 000 mPa.s, e aspecto visual incolor. Nesta pesquisa, após as juntas coladas serem submetidas a ensaios de tração paralela às fibras, foi verificado que todos os corpos de prova das juntas biseladas e das juntas encaixadas romperam-se na madeira, e 87% dos corpos de prova de juntas sobrepostas obtiveram ruptura no adesivo.

Carneiro (2010), submeteu a ensaio de tração juntas coladas dos tipos, de topo, biselada e encaixada, coladas com resina epóxi Compound, no qual seu endurecedor

é um composto de poliamino-amina. Este adesivo é de consistência pastosa e colocação cinza. Os resultados dos ensaios para juntas biseladas, apresentaram resistência próxima à resistência da madeira sólida. Já para juntas coladas de topo e encaixadas, essas apresentaram ruptura no adesivo.

Uma outra variação de adesivo epóxi, foi utilizado por Bianchi (2020). A autora confeccionou uma estrutura de bambu em escala reduzida para a comparação de uma estrutura em escala real. Neste caso, utilizou o adesivo denominado comercialmente Durepox como elemento auxiliar de ligação de colmos de bambu, sujeitos à tração, à uma máquina de ensaios. O adesivo usado é composto por uma resina epóxi e endurecedor a base de poliamida com cargas minerais, possuindo coloração cinza.

Pigozzo *et al.* (2022), avaliaram a ancoragem de barras de aço coladas em corpos de prova em madeiras de *Pinus* e *Corymbia*, solicitadas a esforços axiais. No estudo foram utilizados adesivos estruturais de epóxi e poliuretano a base de óleo de mamona. Os adesivos epóxi usados na pesquisa foram os bicomponentes Compound-injeção, AR 300 e Sikadur-32 fluido, na qual segundo os autores, os dois primeiros possuem uma consistência líquida e o Sikadur-32 uma consistência pastosa. Os autores concluíram que em comparação ao adesivo poliuretano, os adesivos a base de epóxi foram mais indicados para reforço ou colagens de barras de aço em madeira.

Estes estudos demonstram a variedade de adesivos epóxi existentes, assim como suas diversas formulações e possíveis aplicações.

2.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE JUNTAS COLADAS EM ÂNGULOS DIFERENTES.

No que se refere a resistência ao cisalhamento de juntas coladas, o adesivo possui a função de aderir aos dois substratos, fluindo e preenchendo os vazios entre as juntas, gerando interações entre o adesivo e o substrato (PIZZI, 1994). As tensões geradas no produto colado exercem extrema importância no balanço geral da resistência, sendo que quanto maior a resistência da linha de cola em relação a resistência da madeira, maior será a porcentagem de ruptura ou falhas na madeira. As tensões geradas na linha de cola manifestam-se através de esforços de

cisalhamento no plano de ligação adesiva e no sentido perpendicular ao mesmo (PINTO, 2011). Desse modo para avaliar a eficiência do adesivo aplicado a uma junta colada, o adesivo deve ser submetido a testes de carregamento específico, como por exemplo, o de cisalhamento na linha de cola. A resistência das uniões das peças irá depender da resistência de cada elemento envolvido na união (CARNEIRO, 2010).

Fatores como defeitos na região da junta colada, como nós e fibras irregulares, podem diminuir a resistência física e mecânica do produto colado, sendo que a qualidade da colagem realizada também irá variar de acordo com a espécie de madeira, gramatura, pressão aplicada e temperatura de trabalho. (NASCIMENTO *et al.*, 2001).

Pesquisas realizadas por Padilha *et al.* (2023) e Possa *et al.* (2024) demonstraram que o fator ângulo de colagem também interfere na resistência das juntas coladas. Ambos confeccionaram juntas coladas em diferentes ângulos entre as fibras da madeira, sendo os ângulos de 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° e 90°. Ao submeter as juntas coladas com adesivo a base de óleo de mamona a ensaios de cisalhamento sob compressão, os resultados de Padilha *et al.* (2023) mostraram que as maiores resistências obtidas foram com as das juntas coladas a 0°. O mesmo aconteceu com o trabalho realizado por Possa *et al.* (2024), que utilizando o bicomponente 1C-PUR como adesivo, mostrando que as juntas coladas a 0° possuíam maiores resistências ao cisalhamento a compressão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para a realização do experimento, os materiais utilizados foram tábuas de *Pinus sp.* e um adesivo bicomponente à base de resina epóxi. O adesivo é comercialmente denominado Araldite Náutico, sendo o endurecedor à base de químicos como a trietilenotetramina, ácido graxo e dímeros. Segundo o fabricante, ele pode ser utilizado na colagem de vários segmentos, entre eles na construção civil, automotiva, metal mecânica e na indústria náutica, aderindo a materiais como madeira, concreto, pedras e fibras naturais. O adesivo é aplicado a partir da mistura de dois componentes, e apresenta uma consistência pastosa de cor bege. Os componentes possuem, segundo o fabricante, uma viscosidade aparente entre 200

000 – 350 000 cP e 80 000 - 150 000 cP, respectivamente, para a resina e o endurecedor. O mesmo lote de madeira foi utilizado nas pesquisas de Possa *et al.* (2024) e Padilha *et al.* (2023), nas quais os autores trabalharam com os adesivos poliuretano 1C-PUR e adesivos à base de óleos vegetais, respectivamente.

3.2 CARACTERIZAÇÃO

Para a seleção do material foi realizada preliminarmente uma análise visual, na qual as lâminas de madeira com aspectos defeituosos foram descartadas. As peças utilizadas no trabalho foram 48 lâminas com dimensões de 14 x 70 x 2,30 cm³ e 155 lâminas com dimensões de 6 x 70 x 2,30 cm³. O material foi armazenado de modo a entrar em equilíbrio higroscópico com o ambiente do laboratório.

Após a seleção, as peças foram pesadas e classificadas quanto a sua densidade aparente. Seis grupos de densidade distintos foram estabelecidos, os quais foram denominados de blocos do experimento. Os valores médios de densidade estão indicados na Tabela 01. Essa classificação foi pensada para controle do experimento.

Tabela 01 – Valores médios de densidade aparente após a classificação das peças (g/cm³).

	GRUPO 01	GRUPO 02	GRUPO 03	GRUPO 04	GRUPO 05	GRUPO 06
Min.	0,47	0,49	0,52	0,52	0,54	0,63
Méd.	0,50	0,53	0,55	0,57	0,58	0,66
Máx.	0,54	0,58	0,61	0,61	0,64	0,71

3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foi realizada a confecção de juntas, em um total de nove ângulos (0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° e 90°), das quais foram extraídos corpos de prova que foram destinados a ensaios de resistência ao cisalhamento sob compressão e cisalhamento sob torção.

Para cada colagem as lâminas sofreram processamento em máquinas de modo a obter-se as dimensões definitivas e as superfícies limpas e planas, adequadas ao procedimento. Na execução da colagem, lâminas de dimensões 6 x 12 x 2,1 cm³ foram sobrepostas em lâminas de 14 x 15 x 2,1 cm³, de acordo com o ângulo desejado. Com o auxílio de contenções laterais, as lâminas foram fixadas de acordo com o ângulo, evitando

assim um deslizamento no momento da prensagem. Para cada junta colada, foi previsto a extração de dois corpos de prova (CP) pareados, um para ensaio à compressão (C) e outro para ensaio à Torção (T). A Figura 11 ilustra o esquema de colagem, a extração dos corpos de prova (Fig 11.a), suas medidas (Fig.11b) e uma parcela de junta colada (Fig. 11c).

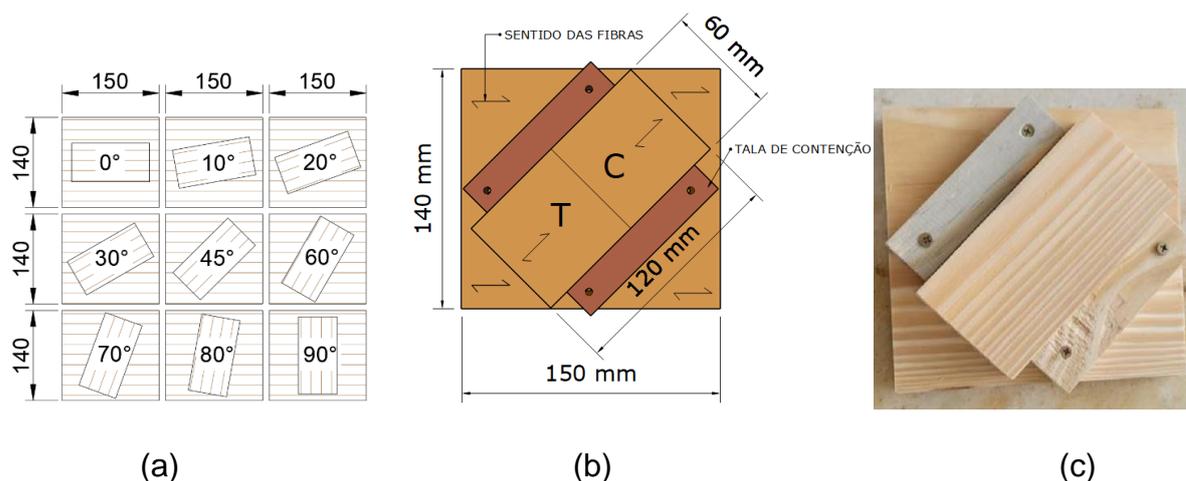


Figura 11 – Extração e colagem dos corpos de prova (medidas em mm).

Fonte: autor (2024).

O adesivo foi preparado com a mistura da resina e do endurecedor em uma proporção em massa de 1:1. A mistura foi feita por aproximadamente 3 minutos até a obtenção de material de coloração homogênea, conforme recomendação do fabricante.

Na colagem, utilizou-se uma espátula para espalhar o adesivo em apenas uma das faces de uma das lâminas de madeira como demonstrado na Figura 12. O consumo adotado foi de 250 g/m², sendo utilizada uma balança analítica para sua verificação. Esse processo durou em média 30 minutos para colar cada grupo de densidade, com os nove ângulos previstos. Após a colagem as peças foram destinadas à prensagem, com pressão de 1 MPa a qual foi aplicada com auxílio de um torquímetro eletrônico previamente calibrado. A Figura 13 ilustra a prensa e a colagem de um grupo de densidade.



Figura 12 – adesivo espalhado em uma das faces da madeira.

Fonte: autor (2024).

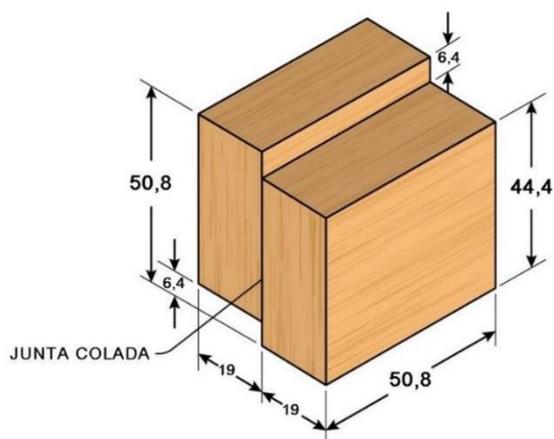
O tempo de prensagem foi de 12 horas, sendo a pressão conferida 30 minutos após a primeira prensagem. O ambiente no qual foram realizados os trabalhos foi instrumentado para manter-se a aproximadamente 25 C°. A cada colagem os ângulos eram sorteados para as posições existentes na prensa.

Obteve-se um total de 108 parcelas, que foram subdivididas em duas partes com tamanhos iguais. Cada parte foi aleatorizada, sendo uma submetida ao ensaio de compressão (C) e outra para o ensaio de torção (T), totalizando 216 corpos de prova, ressaltando que para cada ângulo e grupo ensaiado executou-se duas replicações. Os corpos de prova feitos para serem rompidos ao cisalhamento sob compressão, tiveram como diretriz de confecção e ensaio a ASTM D905 (2013), com dimensões ilustradas na Figura 14.a.

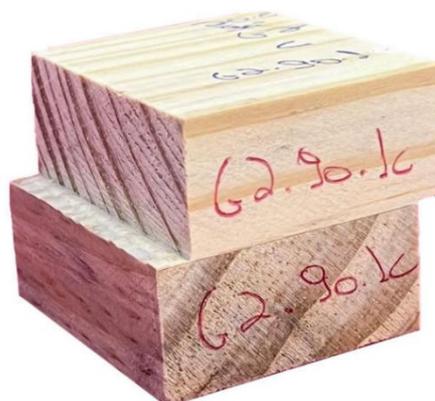


Figura 13 – Aparato de prensagem com as lâminas coladas.

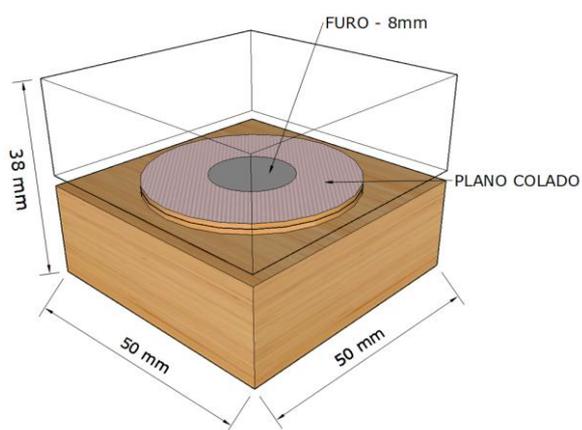
Fonte: autor (2024).



(a) Medidas dos CPs para compressão.



(b) CP destinado ao ensaio à compressão.



(c) Medidas dos CPs para torção.



(d) CP destinado ao ensaio à torção.

Figura 14 – Corpos de prova para os ensaios (dimensões em mm).

Fonte: autor (2024).

3.4 ENSAIO

Foi adotada a metodologia proposta por Petruski *et al.* (2020) para executar os ensaios dos corpos de prova para a torção. Essa metodologia consiste em um aparato que induz o plano colado ao esforço de torção pura, como ilustrado na Figura 15.b.

Para a execução dos ensaios foram utilizadas duas máquinas, uma para ensaio à compressão e outra para o ensaio sob torção, ambas utilizando uma mesma célula de carga de 50 KN. No ensaio de cisalhamento sob compressão os corpos de prova foram fixados em um aparato específico junto à máquina, como ilustrado na Figura 15.a.

Os cálculos das resistências ao cisalhamento sob compressão e à torção, foram feitos utilizando respectivamente as equações 2 e 3.

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2)$$

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

Na qual:

τ = tensão de cisalhamento (N/m²);

V= força de cisalhamento aplicada (N);

A= área da seção transversal sobre qual a força está aplicada (m²);

τ_{max} = tensão máxima resistente ao cisalhamento na torção (N/m²);

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

I_p = momento polar de inércia (m⁴);

c = raio da seção de ruptura (m).



(a) Ensaio sob compressão.



(b) Ensaio sob torção.

Figura 15 – Corpos de prova dispostos nas máquinas de ensaio utilizadas.

Fonte: autor (2024).

A Figura 16 apresenta as distribuições das tensões no plano colado, para o ensaio de compressão (A), e para o ensaio de torção (B), para ângulos de 0° e 90° .

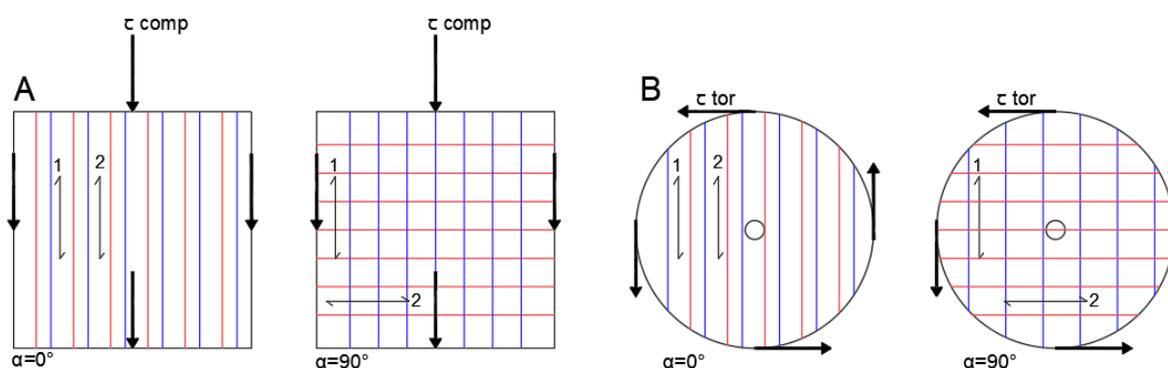


Figura 16 – Distribuição de tensões para os ensaios realizados.

Fonte: autor (2024).

Os valores de resistência obtidos nos dois ensaios foram corrigidos para o teor de umidade de 12 %, conforme orientação da ABNT NBR 7190:2022. Os resultados do experimento foram submetidos a análises estatísticas com alguns objetivos diversos. Pretendeu-se, por exemplo, avaliar a influência sobre a resistência média das juntas dos fatores ângulo e ensaio, o que foi feito com análise de variância. Em adição, procurou-se por meio de análise de regressão avaliar a adequação da equação de Hankinson sendo estimadora da resistência de juntas coladas em ângulos diferentes.

O teste F foi utilizado para verificar se existiram diferenças entre os tratamentos, sendo o teste de Tukey utilizado para detalhar essas informações, permitindo mostrar especificamente quais tratamentos diferem, ou não, estatisticamente. A equação 4 apresentada a seguir representa um modelo possível de análise estatística e que foi utilizado nesta pesquisa.

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

Na qual:

μ = efeito médio geral;

g_k = efeito do k -ésimo grupo ou bloco;

α_i = efeito do i -ésimo ângulo;

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

τ_j = efeito do j -ésimo ensaio;

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

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

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

$j = 1$ ou 2 ;

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

Na análise realizada, os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias não foram rejeitados e, assim, garantiu-se aplicar o do teste F (ANOVA). Ao identificar uma diferença entre os níveis dos fatores estudados, foi aplicado o teste Tukey de comparação das médias a 5% de significância.

Para julgar a adequação da equação de Hankinson, foi assumido um modelo estatístico de regressão não linear, conforme apresentado na equação 5. Seu ajuste foi julgado por análises gráficas, pela significância dos parâmetros e pelo coeficiente de determinação (R^2), o qual segundo MAZUCHELI *et. al.* (2002) fornece a proporção da variação total de uma variável Y, explicada pela variável X através da função ajustada. O valor do R^2 deve ficar entre 0 e 1, sendo 0 indicando que o modelo não explica nenhuma variabilidade da variável dependente e 1 indica que o modelo explica toda a variabilidade.

$$\overline{y}_{ij} = \frac{f_{0j} \cdot f_{90j}}{f_{0j} \cdot (\text{sen}(\alpha_i))^{b_j} + f_{90j} \cdot (\text{cos}(\alpha_i))^{b_j}} + e_{ij} \quad (5)$$

Na qual:

\overline{y}_{ij} = resistência média do i -ésimo ângulo no j -ésimo ensaio;

f_{0j} = valor da resistência média assintótica do j -ésimo ensaio quando o ângulo tende a zero graus;

f_{90j} = valor da resistência média assintótica do j -ésimo ensaio quando o ângulo tende a noventa graus;

b_j = coeficiente de decrescimento da resistência;

e_{ij} = erro experimental, e as demais variáveis são como definidas na equação 5;

quando $\alpha_i = 0^\circ \Rightarrow y_{ij} = f_{0j}$ e, quando $\alpha_i = 90^\circ \Rightarrow y_{ij} = f_{90j}$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela 02 são apresentados os valores médios da resistência obtida por ângulos e ensaios, com os respectivos desvios-padrão e, entre parênteses, os coeficientes de variação. Para os dois ensaios observou-se perda da resistência ao cisalhamento conforme o aumento do ângulo de colagem. Contudo, no ensaio sob compressão a perda foi maior, superando 50% da resistência inicial considerados os valores extremos dos ângulos, estudados a partir de 0°. No ensaio sob torção, considerados os extremos, a perda foi da ordem de 20%. Estes resultados são muito próximos dos encontrados por Possa *et al.* (2024), que observaram perdas de 55% e 18%, respectivamente, para os ensaios sob compressão e torção, consideradas as resistências entre os ângulos de 0° e 90°. Para o estudo de Padilha *et al.* (2023), que também usaram este mesmo lote de madeira e adesivo à base de óleos vegetais, as perdas foram mais severas para os dois ensaios: 63% na compressão e 37% na torção.

Tabela 02 - Médias das Resistências e variabilidade observada, de acordo com o ângulo e ensaio conduzidos.

Ângulo	Resistências médias por ensaio (MPa)	
	1 - Compressão	2 - Torção
0°	9,19 ± 0,47 (5,11%)	7,36 ± 0,62 (8,42%)
10°	9,79 ± 0,46 (4,69%)	7,11 ± 0,71 (9,98%)
20°	8,98 ± 1,05 (11,69%)	7,29 ± 0,71 (9,73%)
30°	8,76 ± 0,80 (9,13%)	7,53 ± 0,53 (7,03%)
45°	6,52 ± 0,21 (3,22%)	6,18 ± 0,59 (9,54%)
60°	5,65 ± 0,58 (10,26%)	5,54 ± 0,84 (15,16%)
70°	4,51 ± 0,73 (16,18%)	5,76 ± 0,91 (15,79%)
80°	4,48 ± 1,07 (23,88%)	6,49 ± 1,06 (16,33%)
90°	4,41 ± 0,90 (20,40%)	5,89 ± 0,39 (6,62%)

A maior e a menor resistências médias foram observadas para o ensaio sob compressão, respectivamente, para os ângulos de 10° e 90°. Resultados similares foram observados em outros trabalhos tais como em Possa *et al.* (2024) e Padilha *et al.* (2023), nos quais a maior e a menor resistências foram para os ângulos de 0° e 90°, respectivamente.

Quanto à variabilidade das resistências, julgada pelos coeficientes de variação, pode-se afirmar que esteve abaixo da referência normativa de 28% adotada para resistências tangenciais, como recomenda a NBR 7190 (2022). No Wood Handbook (2020) indica-se no caso geral um coeficiente de variação da ordem de 14% para a resistência da madeira sólida ao cisalhamento paralelo às fibras. Neste caso, a evidência obtida com maior possibilidade de comparação será o coeficiente de variação da resistência das juntas com colagem a 0° e testadas sob compressão, o que deu neste trabalho um C.V. de 5,11%. Neste contexto, parece que a variabilidade observa no experimento esteve dentro de limites aceitáveis.

A Tabela 03 apresenta o resumo da análise de variância do experimento e indica, pela significância do teste de F, que todos os fatores estudados influenciaram nas resistências. Portanto, foram significativos os efeitos do fator ângulo e fator ensaio, bem como a interação ensaios x ângulos. Em adição, houve efeito significativo dos blocos ou grupos de densidade. Neste caso, porém, haja vista ser fator de controle, não houve exploração destes resultados.

Tabela 03 - Resumo ANOVA para os resultados do experimento.

Fontes de Variação	G.L.	Somas de quadrados	Teste F	p-valor
Ângulos	8	208,27	46,195	<0,001
Grupos/Lotes	5	10,28	3,650	<0,008
Erro (parcela)	40	22,54		
Ensaio	1	3,29	8,810	<0,005
Ensaio × Ângulo	8	65,39	21,908	<0,001
Erro (subparcela)	45	16,79		
Total	107	326,55		

Dada a significância da interação, realizou-se o desdobramento da interação no fator ângulo em cada ensaio conduzido, conforme ilustrado na Tabela 04. Percebeu-se que para os dois ensaios houve diferença significativa. Como consequência, fez-se a aplicação do teste de Tukey para teste de médias, a 5% de probabilidade, para os dois ensaios. Os resultados são apresentados na Tabela 04.

Aplicado o teste de múltiplas comparações, obtém-se para o ensaio sob compressão, a existência de 3 classes de resistências, em função dos ângulos de colagem. Neste ensaio, não foi detectada diferença significativa da resistência entre os ângulos de 0° a 30°. O mesmo ocorreu entre os ângulos de 60° a 90°, sendo que

a resistência para o ângulo de 45° difere significativamente dos ângulos menores (0 a 30°) e dos maiores que 60°, ou seja, 70° a 90°.

Tabela 04: Resumo ANOVA dado o fator ângulo dentro do ensaio.

Fontes de Variação	G.L.	Somas de quadrados	Teste F	p-valor
Ângulo/ ensaio 1	8	245,50	65,53	<0,001
Ângulo/ ensaio 2	8	28,15	7,51	<0,001
Erro combinado	79,51	37,24		

Tabela 05: Resultado médio das resistências segundo teste Tukey, a 5% de significância.

Ângulo	Ensaio			
	1 - Compressão		2 - Torção	
	Média	classes	Média	classes
0°	9,19	a	7,36	xy
10°	9,79	a	7,11	xy
20°	8,98	a	7,29	xy
30°	8,76	a	7,53	x
45°	6,52	b	6,18	yzw
60°	5,65	bc	5,54	w
70°	4,51	c	5,76	w
80°	4,48	c	6,49	xyzw
90°	4,41	c	5,89	zw

Para o ensaio conduzido à torção, nota-se uma diferença menos consistente, com a formação de 4 classes de resistência. O resultado indica que não existiu diferença significativa entre os ângulos de 0° a 30°, incluso 80°. O mesmo se aplica para resistências de ângulos entre 0° a 20°, inclusos 45° e 80°. Foram também consideradas resistências estatisticamente iguais aquelas para os ângulos de 45°, 80° e 90° e entre 45° a 90°.

A avaliação das eventuais diferenças de resistências por ensaio, em cada ângulo estudado, foi feita a partir do expresso na Tabela 06. Conforme ilustrado, para os nove ângulos, as resistências foram consideradas diferentes, a 1% de significância, para sete destes ângulos. Só puderam ser consideradas iguais para os ângulos de 45° e 60°, ou seja, para ângulos intermediários. Este fato também foi observado por outros pesquisadores (Padilha *et al.*, 2023; Petruski *et al.*, 2020) e parece uma ocorrência esperada uma vez que, a partir de um certo ângulo, as resistências ao cisalhamento sob

compressão passam a ser inferiores àquelas obtidas sob torção.

Tabela 06: Resumo ANOVA dado o fator ensaio dentro do ângulo.

Fontes de Variação	G.L.	Somas de quadrados	Teste F	p-valor
Ensaio/ ângulo: 0°	1	10,09	27,04	<0,001
Ensaio/ ângulo: 10°	1	21,61	57,93	<0,001
Ensaio/ ângulo: 20°	1	8,61	23,09	<0,001
Ensaio/ ângulo: 30°	1	4,52	12,12	0,001
Ensaio/ ângulo: 45°	1	0,35	0,93	0,340
Ensaio/ ângulo: 60°	1	0,03	0,09	0,759
Ensaio/ ângulo: 70°	1	4,74	12,70	0,001
Ensaio/ ângulo: 80°	1	12,10	32,45	<0,001
Ensaio/ ângulo: 90°	1	6,60	17,70	<0,001
Erro (subparcela)	63	16,79		

A análise de regressão conduzida para avaliar o emprego da equação de Hankinson como modelo estimador da resistência ao cisalhamento em função do ângulo de colagem, retornou os resultados apresentados na Tabela 07. Merece destaque o fato de que a equação estudada ajustou-se à previsão da resistência ao cisalhamento à compressão, com coeficiente de determinação de 0,898, o que é relevante. Por outro lado, não permitiu ajuste para o ensaio de torção, haja vista um coeficiente de determinação pouco expressivo e igual a 0,30.

Restringindo a análise ao ensaio normatizado à compressão, conforme ASTM D-905 (2013), percebeu-se que para este trabalho o expoente dos seno e cosseno da equação de Hankinson indicou valor de 2,43, com intervalo de confiança entre 2,22 e 2,65. Padilha *et al.* (2023) e Possa *et al.* (2024), trabalhando com o mesmo lote de madeira, obtiveram igualmente um bom ajuste da equação de Hankinson na compressão com coeficientes de determinação iguais a 0,756 e 0,732, respectivamente, para colagem de juntas com adesivos poliuretanos à base de óleos vegetais e 1C-PUR. Ainda os pesquisadores encontraram expoentes dos seno e cosseno da equação de Hankinson muito próximos do encontrado nesta pesquisa. Foram obtidos os valores de 2,35 e 2,68, respectivamente, para as pesquisas de Padilha *et al.* (2023) e Possa *et al.* (2024). A título de exemplo o Wood Handbook (2020) cita valores de ajuste da equação de Hankinson com expoentes dos seno e cosseno variando entre 1,5 a 2,5 para diferentes propriedades mecânicas da madeira.

Tabela 07 - Parâmetros estimados para o modelo de Hankinson juntamente com o intervalo de confiança de 95% nos dois ensaios.

Ensaio	Parâmetros			
	\widehat{f}_{w0_j}	\widehat{f}_{w90_j}	\widehat{b}_j	R_j^2
1-Compressão	9,45 [9,02; 9,90]	4,29 [3,97; 4,61]	2,43[2,22; 2,65]	0,898
2-Torção	7,47 [6,95; 8,03]	5,99 [5,49; 6,52]	1,89 [1,59; 2,20]	0,300

A NBR 7190 (2022) continua a adotar o valor constante igual a 2 para expoente dos seno e cosseno na equação de Hankinson. Embora o Wood Handbook (2020) e a atual NBR 7190 (2022) não mencionem o uso da equação estudada em situações de colagem, o valor 2 sugerido pela norma brasileira pode ter vantagens sobre a segurança. Ao utilizar-se o valor 2, quando o ajuste do modelo/fórmula indica valor superior, os resultados retornam resistências menores, sendo a favor da segurança. Numa aplicação prática, por exemplo, durante o projeto de uma ligação colada, existindo as resistências à 0° e a 90° pode-se, a favor da segurança, usar o expoente dos seno e cosseno igual a 2 caso não se consiga realizar a caracterização da resistência para diferentes ângulos.

Aplicando a equação de Hankinson com os parâmetros apresentados na Tabela 07 pode-se construir o gráfico apresentado na Figura 17. Na Figura, os valores experimentais estão representados por pontos menores e as médias por pontos de maior diâmetro. As linhas contínuas são a representação das resistências estimadas pela equação de Hankinson. O ensaio sob compressão – ensaio 1 está apresentado em vermelho e o ensaio sob torção – ensaio 2 em azul.

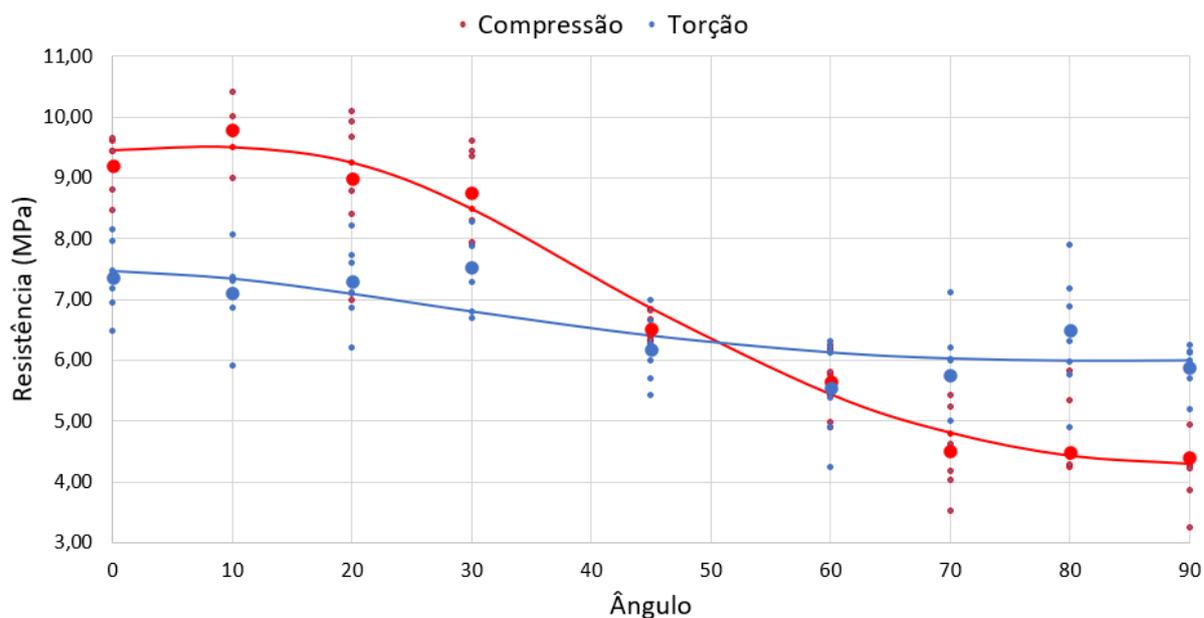


Figura 17 – Valores experimentais e curvas geradas pela fórmula de Hankinson ajustada.

Fonte: autor (2024).

4.2 DESEMPENHO DOS TRÊS ADESIVOS USADOS PARA O LOTE DE MADEIRA

Neste tópico apresenta-se uma breve análise dos resultados obtidos com a colagem deste lote de *Pinus sp.* com os adesivos à base de óleos vegetais (Padilha *et al.*, 2023), 1C-PUR (Possa *et al.*, 2024) e Epóxi (este trabalho). Esta comparação parece justificada uma vez que para todos os adesivos utilizou-se a mesma madeira, foram confeccionadas juntas para os mesmos ensaios e, ainda, utilizou-se a mesma série de ângulos. Parece necessário também mencionar os intervalos de densidade da madeira utilizados nas três pesquisas. Para a pesquisa com adesivo à base de óleos vegetais, utilizou-se 8 grupos de densidades, no intervalo entre 0,427 g/cm³ a 0,694 g/cm³. No trabalho com 1C-PUR foram designados para controle 8 grupos com densidades entre 0,477 g/cm³ a 0,646 g/cm³. Nesta pesquisa utilizou-se 6 grupos de controle da densidade no intervalo entre 0,504 g/cm³ a 0,666 g/cm³. Portanto, quando do uso do adesivo à base de óleos vegetais utilizou-se um intervalo mais amplo e, nesta pesquisa, um intervalo mais restrito.

Na Tabela 08 apresenta-se os resultados de resistência obtidos exclusivamente para o ensaio sob compressão.

Tabela 08 – Resistências médias das juntas coladas para os três adesivos distintos, sob compressão, com o resultado do teste de Tukey a 5% de significância.

Ângulos	Óleos vegetais (a)		1 C – PUR (b)		Epóxi (c)				
	Médias (MPa)	CV (%)	Médias (MPa)	CV (%)	Médias (MPa)	CV (%)			
0°	10,46	a	15,11	9,36	a	12,93	<u>9,19</u>	a	<u>5,11</u>
10°	10,22	ab	22,75	<u>9,27</u>	a	9,06	9,79	a	<u>4,69</u>
20°	9,87	ab	20,75	9,56	ab	15,17	<u>8,98</u>	a	<u>11,69</u>
30°	<u>8,44</u>	b	13,86	9,17	ab	16,79	8,76	a	<u>9,13</u>
45°	<u>6,4</u>	c	13,86	7,66	bc	21,67	6,52	b	<u>3,22</u>
60°	<u>5,1</u>	cd	10,8	6,36	cd	20,28	5,65	bc	<u>10,26</u>
70°	<u>4,39</u>	d	<u>8,03</u>	5,27	de	25,05	4,51	c	16,18
80°	<u>4,22</u>	d	<u>11,28</u>	4,75	e	22,74	4,48	c	23,88
90°	<u>3,9</u>	d	<u>13,1</u>	4,18	e	28,47	4,41	c	20,4
Médias	7		14,39	7,29		19,13	<u>6,92</u>		<u>11,62</u>

Fonte: (a) Padilha et. al. (2022), (b) Possa et. al. (2024), (c) autor (2024).

Considerada a série de ângulos, o adesivo à base de óleos vegetais foi o que apresentou a maior e a menor resistência, respectivamente, para os ângulos de 0° e 90°. Ressalta-se que foi exatamente para este adesivo que foi utilizada madeira com maiores e menores valores de densidade.

Quanto aos valores médios de resistência foram maiores para o adesivo 1C-PUR que teve desempenho geral melhor e também para todos os ângulos intermediários entre 30° a 80°. Na Tabela 08, os maiores valores das informações estão destacados em negrito e os menores sublinhados. A menor média geral recaiu sobre o adesivo Epóxi, com 6,92 MPa mas, muito próxima das outras médias gerais de 7 MPa (óleos vegetais) e 7,29 MPa (1C-PUR). A partir do ângulo de 30°, sistematicamente, as menores resistências foram obtidas para o adesivo à base de óleos vegetais.

Quanto à variabilidade experimental os resultados com menor variação de resistência foram para a colagem com epóxi, com menores coeficientes de variação – CV para seis dos nove ângulos estudados (série inicial entre 0° e 60°). As maiores variabilidades recaíram para colagens com 1C-PUR, com CV geral médio de 19,13% e com 5 maiores variações a partir do ângulo de 30°. O adesivo à base de óleos vegetais apresentou resistências mais variáveis para os três ângulos iniciais.

Com base nas médias obtidas por ângulo, as colagens com adesivo à base de

óleos vegetais perderam resistência de forma sistemática para cada incremento de ângulo estudado. Esta perda sistemática, contudo, não foi sempre observada para os adesivos 1C-PUR e Epóxi.

Houve ajuste significativo da equação de Hankinson como preditora da resistência de juntas coladas para ângulos entre 0° e 90° no ensaio de compressão para todos os adesivos. Destaque-se os valores dos coeficientes de determinação ajustados (R^2) obtidos e iguais a 0,756 (óleos vegetais), 0,732 (1C-PUR) e 0,898 (Epóxi). Neste aspecto, observa-se que, o ajuste foi qualitativamente melhor para o adesivo Epóxi. Na Figura 18 apresenta-se as curvas que representam, para cada adesivo, o modelo de Hankinson ajustado. Convém destacar que para cada adesivo existem valores de entrada os quais são as resistências para os ângulos de 0° e 90° . Ainda, os valores dos expoentes dos seno e cosseno também são parâmetros de cada ajuste. Nestes casos os expoentes ajustados foram iguais a 2,35 (óleos vegetais), 2,68 (1C-PUR) e 2,43 (Epóxi).

Em todos os três estudos os valores dos expoentes dos seno e cosseno foram superiores a 2, valor adotado na NBR 7190 (2022). Então, decidiu-se representar no gráfico, em adição, uma curva genérica com valores iniciais médios para 0° e 90° mas com os expoentes dos seno e cosseno igual a 2. É a curva plotada em verde. Percebe-se que, no caso geral, os valores estimados usando $b=2$ são na grande maioria das vezes inferiores aos ajustados nos estudos ($b > 2$). Isto pode ser útil no projeto de ligações coladas em ângulos, conforme relatam Petruski *et al.* (2020). Ocorre que, não havendo possibilidade de ajustar-se o modelo estudando uma série considerável de ângulos entre 0° e 90° , as informações para estes dois ângulos (estimadores) associada a um valor de $b = 2$, pode estimar os valores intermediários, retornando valores subestimados e, portanto, a favor da segurança.

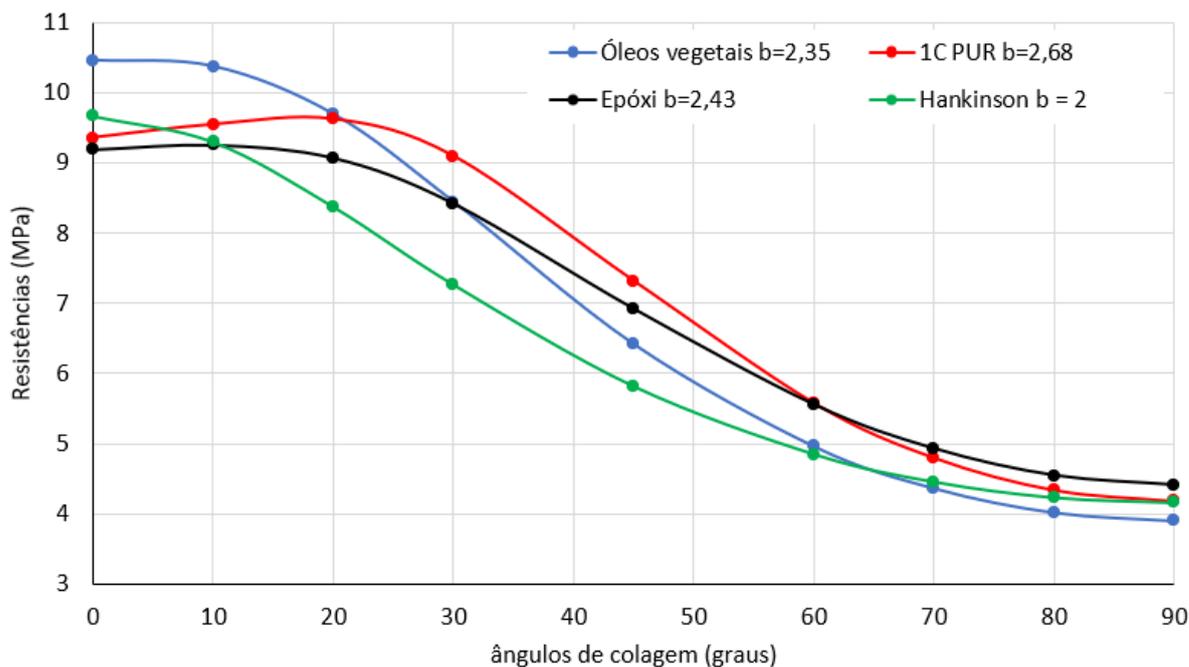


Figura 18 – Equações de Hankinson representadas para as pesquisas conduzidas, ensaios sob compressão.

Fonte: autor (2024).

Considerado o ensaio sob compressão, as resistências médias para os três adesivos foram bastante próximas: 6,92 MPa para o epóxi; 7,00 MPa para óleos vegetais e 7,29 MPa para 1C-PUR. Contudo, considerada a resistência ao cisalhamento da madeira sólida, citada por Possa *et al.* (2024), encontrou-se resultado médio de 12,17 MPa. Então, neste quesito, o adesivo à base de óleos vegetais foi aquele que mais próximo chegou deste valor, neste caso, 10,46 MPa (86%).

Na Tabela 09 estão informadas as médias de resistências no ensaio de torção. Novamente estão em **negrito** as informações de maior valor e em sublinhado as menores.

No desempenho geral, o adesivo poliuretano 1C-PUR foi o mais resistente, com média geral igual a 7 MPa sendo que foi sistematicamente mais resistente à exceção do ângulo de 80°. Ao contrário, o adesivo com menores valores de resistência foi aquele à base de óleos vegetais, com média geral igual a 6,13 MPa e com valores inferiores aos outros em sete dos nove ângulos estudados.

Quanto à variabilidade das resistências sob torção, esta foi sistematicamente maior quando do uso do adesivo à base de óleos vegetais, exceto para o ângulo de

80°. No geral o adesivo com menores variações das resistências sob torção foi o epóxi, com menor variabilidade média e menor em seis dos nove ângulos. Esta menor variabilidade associada ao uso do epóxi também foi observada no ensaio sob compressão.

Tabela 09 – Resistências das juntas coladas para os três adesivos, torção.

Ângulos	Óleos vegetais (a)		1 C – PUR (b)		Epóxi (c)	
	Médias (MPa)	CV (%)	Médias (MPa)	CV (%)	Médias (MPa)	CV (%)
0°	<u>7,13</u>	21,6	7,42	13,88	7,36	<u>8,42</u>
10°	<u>6,6</u>	31,82	7,83	14,18	7,11	<u>9,98</u>
20°	<u>6,61</u>	18,76	7,42	17,79	7,29	<u>9,73</u>
30°	<u>6,78</u>	24,34	7,91	11,13	7,53	<u>7,03</u>
45°	<u>6,03</u>	27,86	7,48	18,85	6,18	<u>9,54</u>
60°	5,97	25,46	6,64	<u>10,24</u>	<u>5,54</u>	15,16
70°	5,99	22,2	6,13	<u>12,07</u>	<u>5,76</u>	15,79
80°	<u>5,5</u>	<u>14,91</u>	6,08	21,71	6,49	16,33
90°	<u>4,52</u>	26,55	6,07	7,08	5,89	<u>6,62</u>
Médias	<u>6,13</u>	23,72	7	14,1	6,57	<u>10,96</u>

Fonte: (a) Padilha et. al. (2022), (b) Possa et. al. (2024), (c) autor (2024).

O possível ajuste da equação de Hankinson para ensaios sob torção não foi confirmado. Ao contrário, para todos os adesivos o ajuste deste modelo retornou valores de R^2 muito baixos, inferiores à 0,34. Com os dados disponíveis informados nas pesquisas fez-se a plotagem das resistências conforme apresentado na Figura 19. Obteve-se, também, as retas de regressão linear ajustadas para cada adesivo. Neste caso, conforme apresentado, houve bom ajuste para os modelos lineares e o melhor ajuste ocorreu para resistências sob torção quando do uso do adesivo à base de óleos vegetais, com $R^2 = 0,84$. Dado o comportamento das resistências sob torção, especialmente a tendência indicada pelas retas, parece razoável que, no dimensionamento de juntas coladas sob torção, a estimativa mais pessimista e à favor da segurança, seja o desempenho das colagens à 90°.

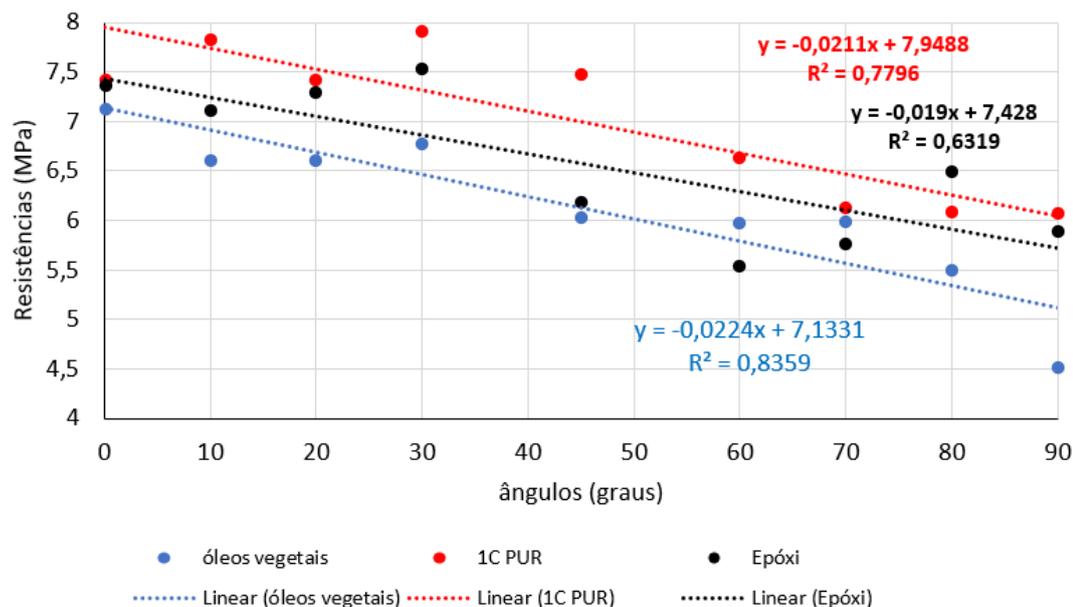


Figura 19 - Resistências sob torção para os três adesivos usados.

Fonte: autor (2024)

Nas três pesquisas as resistências ao cisalhamento à compressão foram diferentes daquelas quando o ensaio se deu por torção do plano colado. O que se deseja evidenciar é o fato de que, para a maioria dos ângulos testados, as resistências obtidas foram diferentes e dependentes do tipo de ensaio conduzido conforme resultado do teste da ANOVA. A Tabela 10 resume estas informações.

Tabela 10 – Comparativo para diferenças entre os ensaios

Adesivos	Resistências estatisticamente iguais, entre ensaios, para os ângulos:
Óleos vegetais	45°, 60° e 90° – (a)
1C PUR	45°, 60° e 70° – (b)
Epóxi	45° e 60° – (c)

Fonte: (a) Padilha et. al. (2022), (b) Possa et. al. (2024), (c) autor (2024).

Conforme ilustrado, para os três adesivos usados com o mesmo lote de *Pinus sp*, os valores de resistência obtidos nos dois ensaios só puderam ser consideradas iguais em, no máximo, 3 dos 9 ângulos estudados. No caso geral, ainda, tais ângulos são ângulos intermediários. Possa *et al.* (2024) fornecem alguns subsídios para tentar melhor compreender este fato. Por fim e como consequência disto, parece haver boas razões para afirmar que os resultados dos dois ensaios são, com mais frequência, diferentes entre si.

5. CONCLUSÃO

Nas condições de desenvolvimento deste trabalho e, com base nos resultados, pode-se concluir que:

- A equação de Hankinson mostrou-se adequada para estimar valores de resistência no cisalhamento sob compressão das juntas coladas com adesivo epóxi. Ao contrário, as resistências das juntas coladas submetidas à torção não puderam ser estimadas utilizando a equação estudada;
- Os valores de resistência no ensaio sob compressão foram diferentes daqueles obtidos no ensaio sob torção;
- Para os dois ensaios observou-se uma tendência das resistências médias das juntas coladas diminuírem conforme o ângulo aumentava de 0° a 90°;
- O adesivo epóxi utilizado atingiu, em colagens com fibras paralelas e sob compressão 9,79 MPa o que, comparativamente à resistência da madeira sólida, equivaleu a 80% desta resistência.

Ainda, com base em resultados de pesquisas anteriores, mencionados na literatura, e nos outros dois trabalhos conduzidos com diferentes adesivos e com o mesmo lote de madeira utilizado neste trabalho, pode-se inferir que existem evidências para considerar que:

- Pode-se utilizar a equação de Hankinson para estimar a resistência de juntas coladas em diferentes ângulos, sob esforço normal, independentemente do adesivo utilizado e espécie de madeira colada;
- O desempenho mecânico de juntas coladas à diferentes ângulos é dependente do tipo de esforço gerador da ruptura, ou seja, esforço normal ou momento de torção na junta colada.

A pesquisa realizada permite estudos futuros, a exemplo da utilização do adesivo epóxi em outras espécies de madeira. Sugere-se o uso de espécies de reflorestamento tais como o Eucalipto e a Teca.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRUZZI, R. C. *et al.* **Relação das Propriedades Mecânicas e Densidade de Postes de Madeira de Eucalipto Com Seu Estado de Deterioração.** Revista Árvore, Viçosa, v. 36, p. 1173-1182, 2012.

ACTONOSTRY; **Brock Commons Tallwood House** - 2017. Disponível em: <https://www.actonostry.ca/work/education/ubc-brock-commons-tallwood-house>
Acesso em: 01 OUT. 2024.

ALENCAR, Ane *et al.* **Amazônia em chamas: o novo e alarmante patamar do desmatamento na Amazônia.** Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2022.

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.

AMARAL, C. R. *et al.* **Impact of Aliphatic Amine Comonomers on DGEBA Epoxy Network Properties.** Polymer Engineering and Science, v. 54, p. 2132 – 2138, 2013.

ANAGNOSTOU, Georgios. **The influence of traditional Japanese timber Design and construction techniques on contemporary architecture and its relevance to modern timber construction,** Gottstein Fellowship repor, Sydney, 2018.

ARAÚJO A.P. **Analysis of variance of primary data on plant growth analysis.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, 38:1-10, 2003.

ARAÚJO R. **Alternativas sustentáveis de uso da madeira na construção civil.** Especialize. 34,1-15, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 7190: **Projeto de Estruturas de Madeira Parte 1.** Rio de Janeiro, 2022.

Adhesively bonding plastic Structural Components in Automotive Applications
disponível em
<http://www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath=automotive/pdfs/noreg/299-5055.pdf&pdf=true>. Acesso em: 01 OUT. 2024.

A3Z0: **HoHo Vienna** - 2016. Disponível em: https://www.turn-on.at/turn-on_18/program.php?id=312. Acesso em: 01 OUT. 2024.

BIANCHI, G. **Confecção de Uma Estrutura de Bambu: Análise Comparativa de Uma Estrutura em Escala Real Conforme Estudos Realizados em Modelo Reduzido Distorcido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, São Paulo, 2020.

BOYLE, M. A. *et al.* Epoxy resins. In: MIRACLE, D. B.; DONALDSON, S. L. ASM Handbook: **Composites. Materials Park, Ohio: ASM International**, v. 21, p. 76 – 89, 2021.

BRAZ, R. L. *et al.* **Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de Toona ciliata em Diferentes Idades. Floresta.** Curitiba, v. 43, p. 663-670, 2013.

CARNEIRO, R. P. **Colagem de Junta de Madeira Com Adesivo Epóxi.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

CAMARGO, Helena Dias de Oliveira. **Arquitetura contemporânea em madeira: estudos do projeto, estrutura e elementos de ligações madeira-madeira.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2024.

CALIL, C. N. **A Madeira Laminada Colada.** Revista da Madeira, Caxias do Sul, p. 5, 2010.

CEZARO, J. A. *et al.* **Propriedades Físico-mecânicas da Madeira de Chrysophyllum Marginatum.** Pesquisa Florestal Brasileira, Santa Maria, v. 36, p. 135-143, 2016.

CHEN, C. *et al.* **Epoxy adhesives. adhesives and adhesive joints in industry applications,** London, v. 3, 2019.

COELHO, Thalia Camila et al. **Estudos de adsorção de Cobre (II) em microesferas de quitosana reticuladas com epiclóridrina e impregnadas com heparina.** 2006.

COSTA, Ana Alexandra Pontes da Costa. **Construção de Edifícios com Cross Laminated Timber (CLT).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil-Especialização em Construções Civas) –Curso de Mestrado em Construção civil. FEUP, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2013.

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

CUNHA, R. D.A., CÉSAR, S. F. Arquitetura sustentável em madeira de Pinus e Eucalipto. In: I **CONFERÊNCIA LATINOAMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL E X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO,** São Paulo. Anais, 2004.

DE BARROS ALMEIDA, Maria Olivia; DE BARROS, Michelli Siquiera Monteiro; VILELA, Thamise Sampaio Vasconcelos. **AValiação da Proporcionalidade da Mistura na Cinética de Cura da Resina Epóxi.** 71º Congresso anual ABM week, 2016.

DE SOUZA SANTOS, M.R. *et. al.* **Avaliação da Fabricação de União de Madeira Com Adesivo Epóxi.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.5 p. 6356-6363, 2019.

DOW: **Adhesively Bonding Plastic Structural Components in Automotive Applications.** Disponível em: <https://www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath=automotive/pdfs/noreg/299-50555.pdf&pdf=true>. Acesso em: 01 OUT. 2024.

EVANS, J. W. *et. al.* **Juvenile wood effect in red alder: Analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones.** Forest Products Journal, v. 50, n. 7-8, p. 75-87, 2000.

FINK, J. K. **Epoxy Resins In: Reactive Polymers: Fundamentals and Applications: A Concise Guide to Industrial Polymers.** William Andrew Publishing, Norwich, NY, USA, 2017.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (US). **Wood handbook: wood as an engineering material.** The Laboratory, 1987.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Dados Estatísticos.** São Paulo, 2024. Disponível em: <<https://www.iba.org/dados-estatisticos>> Acesso em: 06 out. 2024.

IPCC – **The Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) Summary for Policymakers.** Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SPM_version_report_LR.pdf (Acesso: 10 out. 2024).

IPCC – **The Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) Summary for Policymakers.** Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf (Acesso: 10 out. 2024).

JHON, V.N. **Construção e desenvolvimento sustentável.** Revista Qualidade na Construção, São Paulo, n23, p.34-44, 2000.

JÚNIOR, CARLOS ROBERTO CORDEIRO, WENDNA CRISTINA ROCHA SILVA, AND PAULO DE TARSO MACHADO LEITE SOARES. **"Uso da madeira na construção civil."** *Projectus* 2.4,79-93, 2017.

KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical properties of wood In:** BERGMAN, R., et al. Wood handbook, Washington, USDA, p.100-145, 2010.

KUMAR, K. S. *et. al.* **Progress in shape memory epoxy resins. Reactive and Functional Polymers,** v.73.2 p. 421-430, 2013.

LINDERS J.: **Haut** - **2024**. Disponível em: <https://www.skyscrapercenter.com/building/haut/26753> Acesso em: 01 OUT. 2024.

LONGSTON, N. B. *et. al.* **Influência do Ângulo Entre Esforço Aplicado e a Direção das Fibras da Madeira Sobre a Resistência ao Cisalhamento**. Ciência Florestal, Santa Maria v. 24, p.969-978, 2014.

MADEIREIRA MADECAL (Belo Horizonte). **Madeiras para construção**. 2014. Disponível em: <http://www.madecalmadeiras.com.br/produto/madeira-para-construcao>. Acesso em: 06 out 2024.

MAZUCHELI, Josmar; ACHCAR, Jorge Alberto. Algumas considerações em regressão não linear. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 6, p. 1761-1770, 2002.

MENEZES, G. W. *et. al.* **Análise Térmica da Resina Epóxi DGEBA/TETA Para Formulações Diferentes da Razão Estequiométrica**. ABM. v. 1, n. 1, p. 12-16, 2004.

NASCIMENTO, A. M.; DELLA LUCCIA, R. M.; VITAL, B. R. Colagem de emendas biseladas em madeiras de Pinus spp. e Eucalyptus citriodora. **Revista Floresta e Ambiente**; Rio de Janeiro, v. 8, p. 44-51, 2001.

PADILHA, V. H. L. *et al.* **Resistência ao Cisalhamento à Compressão e à Torção de Juntas Coladas de Pinus e Adesivo Poliuretano Confeccionadas Com Diferentes Ângulos**. Revista Árvore, Viçosa, v. 47, 2023.

PETRAUSKI, A. *et. al.* **Methodology and Device to Obtain Torsional Shear Strength of Glued Joints**. Revista Floresta, v. 50, n. 4, 2020.

PETRAUSKI, C. *et. al.* **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, Vargem Grande Paulista v. 11, n. 14, 2022.

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

PIGOZZO, J. C. *et al.* **Análise de Barras de Aço Acoradas na Madeira Utilizando Adesivos Estruturais**. Ambiente Construído, Porto Alegre v. 23, p. 145-156, 2022.

PIZZI, A; **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcell Dekker; p. 289, 1994.

PINTO, J.A. Análise da viabilidade do uso da madeira de "Cryptomeria japonica" para laminação e produção de painéis compensado. 2011, 92p. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)** - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

POSSA, D. C. *et al.* **Construção e Ensaio de Pórticos Com Tirante em Madeira Laminada Colada**. Research, Society and Development, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 2, 2022.

POSSA, D. C. *et al.* **mechanical performance of adhesive bonded joints with 1c-pur adhesive at different angles.** Revista Árvore, Viçosa, v. 48, 2024.

ROMÃO, B. M. V. *et. al.* **Caracterização por FTIR de Agentes de Cura Utilizados em Resinas Epoxídicas-II-polimercaptana, Poliaminoamida e Amina Modificada.** Polímeros: Ciência e Tecnologia. v. 13, n. 3, p. 173-180, 2003.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et. al.* **Avaliação da Madeira do Híbrido de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla Para Utilização em Madeira Lamelada Colada.** Revista Matéria, v. 26, n. 3, 2021.

SOUTO, Luciano Gustavo; WANDSCHEER, Marcelo. **EDIFÍCIO COMERCIAL COM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DESENVOLVIDOS COM MADEIRA LAMINADA COLADA.** **IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, 2018.

STRINGARI E. H., *et. al.* **Construction and Testing of Glued Laminated Timber Frames for Use in Laying Poultry Houses.** Engenharia Agrícola, p.122-131, 2020.

UNEP – United Nations Environment Programme (2022) Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — **Climate crisis calls for rapid transformation of societies.** Nairobi. Disponível em: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022> (Acesso: 07 out. 2024).

VERDÉLIO, A. – **Uso de madeira na construção civil ajuda a preservar florestas – 2017.** **Artigos UOL.** Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/agencia-brasil/2017/05/06/uso-de-madeira-na-construcao-civil-ajuda-a-preservar-florestas-diz-wwf-brasil.htm> (Acesso: 10 out. 2024).

YIN H, LI B, LIU YT, *et al.* **Synthesis and properties of polyamide curing agent for epoxy resin.** China Adhesives. v. 25, p. 9-12, 2016.

ZHANG, J. *et. al.* **Epoxy Resin Adhesives: Modification and Applications. Epoxy-Based Composites**, p. 89, 2022.

ZHAO JL, ZHANG GC, LI HQ, *et al.* **Research progress in toughening epoxy resin. Plastics.** v. 31 p. 40-44, 2002.

ZENID, Geraldo José *et al.* **Madeira: uso sustentável na construção civil.** **São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas–SVMA**, 2009.