DESIRÈ CORAÇA POSSA

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS COLADAS COM DIFERENTES ADESIVOS E ANÁLISE ESTRUTURAL DE COLUNAS EM MADEIRA LAMELADA COLADA COM REFORÇOS EM AÇO

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2025

DESIRÈ CORAÇA POSSA

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS COLADAS COM DIFERENTES ADESIVOS E ANÁLISE ESTRUTURAL DE COLUNAS EM MADEIRA LAMELADA COLADA COM REFORÇOS EM AÇO

Tese 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 Doutor.
Orientador: Prof. Dr. Alfredo Petrauski
Coorientador: Prof. Dr. Mateus Couri Petrauski

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2025

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

Coraça Possa, Desirè
Avaliação da resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e análise estrutural de colunas em madeira lamelada colada com reforços em aço / Desirè Coraça Possa; orientador Alfredo Petrauski; coorientador Mateus Couri Petrauski. -- Cascavel, 2025.
152 p.

Tese (Doutorado 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, 2025.

1. Estruturas de madeira. 2. Estruturas mistas. 3. Peças comprimidas. 4. Adesivo. I. Petrauski, Alfredo, orient. II. Couri Petrauski, Mateus, coorient. III. Título.

DESIRÈ CORAÇA POSSA

Avaliação da resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e análise estrutural de colunas em madeira lamelada colada com reforços em aço

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biomassa e culturas energéticas, APROVADA pela seguinte banca examinadora:

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

Sandra Maria Ferreira Couri Petrauski
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

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

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

Alessandra dos Santos
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG)

Rodrigo Aparecido Jordan
Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

Cascavel, 27 de fevereiro de 2025

“Dedico este trabalho à minha família, principalmente às minhas irmãs, Débora e Denise.”

AGRADECIMENTOS

Durante todos esses anos na pós-graduação, marcados por muito estudo, aprendizado e dias no laboratório, inúmeras pessoas me acompanharam e foram fundamentais para a realização desta tese. Expresso aqui minha sincera gratidão a cada uma delas por sua importância na minha formação pessoal e profissional.

Primeiramente, devo agradecer aos meus pais, Degilmar e Carla, por sempre me apoiarem ao longo da minha vida. A quem devo a minha educação e criação, nunca medindo esforços para me ver bem e feliz. Especialmente à minha mãe, que me incentivou na carreira acadêmica e com quem compartilho a mesma profissão. Quero sempre ser motivo de orgulho para vocês.

Agradeço às minhas irmãs, Débora e Denise, minhas companheiras de vida e de amizade. Vocês sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado nos momentos em que mais precisei, fossem eles bons ou ruins, tendo fé em mim em momentos em que eu não tinha. Sou eternamente grata por tê-las como irmãs.

Uma pessoa tão importante quanto meus pais, foi a minha avó, Eugênia. Uma das minhas pessoas favoritas neste mundo, com um coração bondoso e que sempre me confortou quando precisei. Agradeço por todas as tardes passadas juntas, costurando, conversando ou me dando apoio enquanto escrevia esta tese.

Ao meu namorado, Wilians, por estar sempre ao meu lado e ser meu companheiro. Obrigada por cada gesto de carinho, por estar presente nos meus dias e por toda ajuda, especialmente nas fotos tiradas para este trabalho.

Aos meus irmãos pets, Barbie, Billy, Bóris, Carlota e Petruchio, e ao meu filho pet, Miguel, que sempre estiveram ao meu lado enquanto passávamos as madrugadas na sala, escrevendo esta tese. Todo o meu amor e carinho a esses seres que me amam e demonstram, da maneira mais linda, esse afeto, sempre me recebendo com alegria quando chego em casa.

Aos meus filhos pets, que ganhei ao conhecer o Will - Alecrim, Lavanda, Neguinha, Cinzinha, Branquinha, Soraia, Marola, Roseta, Malcon, Maria Andréia, Zarolho, Jaiminho, Cacau, Jasmine, e outros gatos que eu, possivelmente, devo ter esquecido -, todo o meu carinho e gratidão. Aos meus sobrinhos pets, Miley, Summer, Shoshanna, Tapioca e Tobias, também dedico todo o meu amor e carinho.

Meu agradecimento mais profundo só poderia ser ao Prof. Alfredo, meu orientador e um querido e grande amigo. Obrigada pelos ensinamentos, pelas

cobranças e, por muitas vezes, deixar de lado seus momentos de descanso para me orientar e auxiliar nestas pesquisas. Agradeço também, por ter acreditado em mim. Sem o seu apoio, confiança e amizade nada disso seria possível. Foi um privilégio trabalhar e aprender com o senhor, e desejo um dia me tornar metade do profissional que o senhor é.

Outras pessoas tão especiais quanto o meu orientador são o Prof. Mateus e a Prof. Sandra, que tiveram papel fundamental na minha formação profissional. Além de me auxiliarem e ensinarem ao longo desses anos, também nos tornamos grandes amigos. Sou eternamente grata por todos os momentos de descontração e de incentivo. Vocês sempre terão um lugar especial no meu coração.

À Prof. Alessandra, por toda a assessoria com a parte estatística do trabalho. Obrigada por sempre disponibilizar parte do seu tempo para me atender e por não medir esforços para tornar estas pesquisas viáveis. Com a sua ajuda, conseguimos melhorar e aprender com as análises dos dados desenvolvidas, não só nesta tese, como também em diversas pesquisas paralelas.

Agradeço aos amigos de pós-graduação que tive o prazer de conhecer nos últimos anos, especialmente à Karina e ao Padilha. Com os quais os dias de trabalho se tornavam leves e descontraídos, fosse tomando um café ou uma coca. Minha eterna gratidão por terem me auxiliado ao longo dessa jornada.

Aos funcionários do LEME/LATEM, a todos os estagiários que passaram por lá e, especialmente, ao Maxer, agradeço por toda ajuda no decorrer deste trabalho e pela amizade.

Aos meus amigos Beatriz, Felipe, Giovane, Larissa, Lukas, Natália e Paulo, que de alguma forma me auxiliaram e incentivaram nesta caminhada. Agradeço por todos os momentos que passamos juntos, reclamando da vida ou nos apoiando, minha família de coração. Saibam que podem contar sempre comigo.

Aos meus alunos e colegas de trabalho da UTFPR, em especial à Lucia e à Silvana. Agradeço pelas conversas, pelos momentos de descontração e, sobretudo, ao apoio durante este período desafiador de dedicação ao trabalho e aos estudos.

Por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa para a realização desta pesquisa.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1C-PUR	Adesivo monocomponente à base de poliuretano
ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCET	Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GL	Graus de liberdade
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LATEM	Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira
LEME	Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia
MLC	Madeira lamelada colada
MLCA	Madeira Lamelada Colada Armada
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
NBR	Norma Brasileira
PFM	Produtos florestais madeireiros
PFNM	Produtos florestais não-madeireiros
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
WCED	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
c	Distância do eixo neutro até a fibra externa da coluna onde ocorre a tensão máximo
E	Módulo de elasticidade para o material
e	Excentricidade da força
$E_{0,05}$	Módulo de elasticidade característico medido na direção paralela às fibras da madeira
E_t	Módulo de elasticidade tangente do material
$f_{c0,d}$	Valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras
$f_{c0,k}$	Resistência característica à compressão paralela às fibras
$f_{m,d}$	Resistência de cálculo na flexão
$\hat{f}_{w0}$	Resistência média na direção paralela às fibras da madeira
$\hat{f}_{w90}$	Resistência média na direção perpendicular às fibras da madeira
I	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo analisado
K_E	Coeficiente associado às condições de vinculação das extremidades das barras
k_M	Coeficiente de correção
L	Comprimento da coluna
L_0	Comprimento de flambagem.
M	Momento fletor
M_d	Valor de cálculo do momento fletor
$N_{c,d}$	Valor de cálculo da força normal de compressão
P	Força de compressão aplicada à coluna
P_{cr}	Força crítica de flambagem
r	Raio de giração da seção transversal
W	Módulo de resistência à flexão
α	Ângulo de colagem
ε	Deformação específica normal
λ	Índice de esbeltez

$\lambda_{rel,x}$	Índice de esbeltez relativa correspondente à flexão em x
$\lambda_{rel,y}$	Índice de esbeltez relativa correspondente à flexão em y
σ_{cr}	Tensão crítica
σ_{lp}	Tensão associada ao limite de proporcionalidade
σ_M	Tensão normal de flexão proveniente do momento fletor de primeira ordem devida às forças laterais
$\sigma_{máx}$	Tensão elástica máxima na coluna ou fórmula da secante
σ_N	Tensão normal atuante
$\sigma_{Nc,d}$	Valor de cálculo da tensão de compressão de cálculo normal à seção transversal
τ_{comp}	Tensão de compressão
τ_{tor}	Tensão de torção

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percentual da área de árvores plantadas por espécie no ano de 2022. 5
Figura 2 – Participação dos valores de produção na silvicultura em 2021. 6
Figura 3 – Participação da área plantada com árvores de pinus por estado, em 2022. 10
Figura 4 – Índices de impactos ambientais de construções de aço, concreto e madeira. 12
Figura 5 – Esquema do isolamento obtido pela carbonização das camadas mais externas da madeira. 14
Figura 6 – Planos de corte da madeira: transversal, radial e tangencial. 15
Figura 7 – Esquema de uma viga em MLC. 16
Figura 8 – Laminação horizontal sem emendas transversais (a) e com emendas transversais (b), laminação vertical sem emendas transversais (c) e com emendas transversais (d). 17
Figura 9 – Detalhes de emendas de lâminas: (a) distribuição das emendas na direção longitudinal; (b) junta por corte em chanfro; (c) emenda dentada vertical; (d) emenda dentada horizontal. 18
Figura 10 – Ilustração representativa das forças de adesão e coesão entre substrato e adesivo. 19
Figura 11 – Flambagem de uma coluna. 22
Figura 12 – Comprimento de flambagem de coluna para várias condições de extremidade. 24
Figura 13 – Tensão crítica de flambagem × índice de esbeltez. 25
Figura 14 – Diagrama tensão-deformação para um material (A) e representação gráfica da Equação 3 para colunas medianamente esbeltas (B). 27
Figura 15 - Coluna com aplicação de força excêntrica. 28
Figura 16 – Aplicação da fórmula da secante para diversos índices de excentricidade (ecr^2). 29
Figura 17 – Tensão × índice de esbeltez para madeira de *Pinus* sp. conforme a ABNT NBR 7190:1997. 31
Figura 18 – Tensão × índice de esbeltez relativo para uma madeira de *Pinus* sp. conforme a ABNT NBR 7190:2022. 36

Figura 19 – Modelo de colagem e extração dos corpos de prova, dimensões em cm. 42
Figura 20 – Sequência de posicionamento do gabarito utilizado para a confecção das juntas com as fibras coladas em diferentes ângulos. 42
Figura 21 - Ensaio de cisalhamento na compressão com o aparato tipo guilhotina na prensa eletromecânica. 43
Figura 22 – Ensaio de cisalhamento na torção com o aparato na Máquina Universal de Ensaios.....44
Figura 23 - Lâmina circular para análise do percentual de falha da madeira. 46
Figura 24 – Lâmina retangular, à esquerda, e lâmina circular, à direita, para análise do percentual de falha da madeira. 47
Figura 25 - Gráficos *boxplot* referente a resistência conforme ângulo de colagem para os ensaios de compressão (C) e torção (T). 51
Figura 26 - Resistência amostral e resistência média de acordo com o ângulo de colagem e o ensaio. 52
Figura 27 – Esquema de distribuição de tensões para o ensaio de cisalhamento na compressão (A e B) e para o ensaio de cisalhamento na torção (C e D).....53
Figura 28 – Pesagem dos componentes do adesivo epóxi Araldite profissional: (A) resina; e (B) endurecedor.....64
Figura 29 – Juntas coladas com o adesivo epóxi Araldite para a obtenção de três corpos de prova, dimensões em cm.....66
Figura 30 – Corpos de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento representando os blocos conforme a densidade aparente em ordem decrescente, sendo estes: Bloco 1 (A), Bloco 2 (B), Bloco 3 (C), Bloco 4 (D), Bloco 5 (E) e Bloco 6 (F).....67
Figura 31 – *Boxplot* da densidade aparente dos corpos de prova conforme o bloco. 70
Figura 32 – Percentual de corpos de prova conforme a orientação dos anéis de crescimento em relação ao plano de colagem. 71
Figura 33 – Gráfico resistência x pressão de colagem para cada consumo de adesivo.....73
Figura 34 – Gráfico resistência x consumo de adesivo para cada pressão de colagem.....73

Figura 35 – *Boxplot* da resistência ao cisalhamento dos corpos de prova de acordo com o bloco. 76
Figura 36 - Superfície de resposta para resistência de acordo com a variação da combinação de consumo e pressão. 77
Figura 37 - Seção transversal das colunas em MLC e MLCA, dimensões em mm. 87
Figura 38 – Superfície da chapa de aço antes (A) e após (B) o processo de limpeza. 89
Figura 39 – Gráfico torque × força para as prensas calibradas. 90
Figura 40 – Confecção das colunas: (A) pesagem e aplicação do adesivo no plano colado; (B) adesivo espalhado sobre a superfície da madeira; e (C) montagem da coluna em MLC com reforço em aço. 91
Figura 41 – Disposição dos aparatos para o ensaio à flexão das colunas, dimensões em cm. 92
Figura 42 – Disposição dos aparatos para o ensaio à compressão das colunas. 94
Figura 43 – Utilização do nível a laser para o nivelamento das colunas (A e B) e apoio de segundo gênero instalado nas colunas (C). 95
Figura 44 – Histograma da quantidade de tábuas pela densidade aparente do lote. 97
Figura 45 – *Boxplot* da densidade aparente do lote de madeira. 97
Figura 46 – Seção transversal da coluna em MLCA, à esquerda, e seção transversal equivalente da coluna em MLC, à direita, dimensões em mm. 100
Figura 47 – Gráficos força × deslocamento obtidos no ensaio à flexão de colunas conforme a densidade aparente. 103
Figura 48 – Gráfico força × deslocamento para o ensaio à flexão das colunas. 104
Figura 49 – Viga submetida à flexão em quatro pontos. 105
Figura 50 – Tensões normais experimentais e teórica para as colunas em MLC. 106
Figura 51 – Tensões normais experimentais e teórica para as colunas em MLCA. 107
Figura 52 – Ensaio da coluna em MLCA de alta densidade à compressão (A) e ocorrência da flambagem elástica da estrutura (B). 109
Figura 53 – Força × deslocamento lateral para as unidades de baixa densidade. 111
Figura 54 - Força × deslocamento lateral para as unidades de média densidade. 112
Figura 55 - Força × deslocamento lateral para as unidades de alta densidade. 112
Figura 56 – Evidência de excentricidade inicial nas colunas sob aplicação de força, destacando o deslocamento do apoio. 113
Figura 57 – Gráfico forças × deslocamentos laterais para todas as unidades 114

Figura 58 – Tensões experimentais e teórica para coluna em MLC de baixa densidade.....115
Figura 59 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLC de média densidade.....116
Figura 60 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLC de alta densidade. 116
Figura 61 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLCA de baixa densidade.....117
Figura 62 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLCA de média densidade.....117
Figura 63 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLCA de alta densidade.....118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais exemplos de produtos florestais madeireiros.....7
Tabela 2 – Principais exemplos de produtos florestais não-madeireiros.....7
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens da utilização da madeira em estruturas.....13
Tabela 4 – Valores dos coeficientes KE.....33
Tabela 5 – Resumo da ANOVA para os resultados experimentais da resistência....47
Tabela 6 - Resumo da ANOVA dado o desdobramento do fator ângulo dentro de ensaio de resistência.....48
Tabela 7 - Resumo da ANOVA dado o desdobramento do fator ensaio dentro de ângulo 48
Tabela 8 - Resistência média ao cisalhamento segundo ensaio e ângulo de colagem 49
Tabela 9 - Coeficientes estimados no modelo de Hankinson e seus respectivos intervalos de confiança e coeficiente de determinação 56
Tabela 10 - Percentual de falha média segundo ensaio e ângulo de colagem 57
Tabela 11 – Resultados do estudo preliminar feito para o adesivo epóxi 65
Tabela 12 - Resultados da densidade aparente por bloco 69
Tabela 13 - Valores médios da resistência ao cisalhamento conforme consumo, pressão e médias por nível da variável estudada 72
Tabela 14 - Quadro da ANOVA com parcela subdividida da resistência 74
Tabela 15 – Coeficientes dos parâmetros de regressão juntamente com o erro padrão associado e o teste T com o valor descritivo (valor p) 75
Tabela 16 – Nomenclatura das colunas confeccionadas 88
Tabela 17 – Resultados da caracterização da madeira de *Pinus* sp.....98
Tabela 18 – Força crítica e tensão crítica conforme o índice de esbeltez.....101
Tabela 19 – Módulo de elasticidade estimado a partir do ensaio de flexão 106
Tabela 20 – Valores de resistência para as colunas em MLC e em MLCA.....108
Tabela 21 – Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão das juntas coladas com adesivo poliuretano 133
Tabela 22 – Resultados do ensaio de cisalhamento à torção das juntas coladas com adesivo poliuretano 135
Tabela 23 - Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão das juntas coladas com adesivo epóxi.....137

Tabela 24 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLC de baixa densidade.....148
Tabela 25 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLCA de baixa densidade.....148
Tabela 26 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLC de média densidade.....148
Tabela 27 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLCA de média densidade.....149
Tabela 28 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLC de alta densidade 149
Tabela 29 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLCA de alta densidade.....149
Tabela 30 – Resultados do ensaio à compressão para a coluna em MLC de baixa densidade.....150
Tabela 31 – Resultados do ensaio à compressão para a coluna em MLCA de baixa densidade.....150
Tabela 32 – Resultados do ensaio à compressão da coluna em MLC de média densidade.....151
Tabela 33 – Resultados do ensaio à compressão da coluna em MLCA de média densidade.....151
Tabela 34 – Resultados do ensaio à compressão da coluna em MLC de alta densidade.....152
Tabela 35 – Resultados do ensaio à compressão da coluna em MLCA de alta densidade.....152

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Força crítica de Euler de flambagem.....23
Equação 2 – Tensão crítica de flambagem 24
Equação 3 – Módulo tangente.....27
Equação 4 - Tensão máxima atuante na coluna com aplicação de força excêntrica 28
Equação 5 – Fórmula da secante.....29
Equação 6 – Condição de segurança para estados limites.....30
Equação 7 – Indice de esbeltez 32
Equação 8 - Índice de esbeltez relativa correspondente à flexão em relação a x.....33
Equação 9 - Índice de esbeltez relativa correspondente à flexão em relação a y.....33
Equação 10 – Verificação de estabilidade para o eixo x. 34
Equação 11 – Verificação de estabilidade para o eixo y. 34
Equação 12 – Coeficiente kcx.....34
Equação 13 – Coeficiente kcy.....34
Equação 14 – Tensão de compressão normal à seção transversal 35
Equação 15 – Tensão de flexão proveniente do momento fletor de primeira ordem 35
Equação 16 – Modelo estatístico para a resistência a 12% de umidade 45
Equação 17 – Modelo não linear de Hankinson.....45
Equação 18 – Função para o ensaio de cisalhamento na compressão 55
Equação 19 – Função para o ensaio de cisalhamento na torção.....55
Equação 20 – Modelo para estimativa da resistência ao cisalhamento 68
Equação 21 – Modelo de regressão para estimar a resistência ao cisalhamento.....68
Equação 22 – Estimativa de resistência ao cisalhamento para o adesivo epóxi.....74
Equação 23 – Lei de Hooke 93
Equação 24 – Tensão normal de flexão.....93
Equação 25 – Tensão normal em um elemento sob força axial.....96
Equação 26 – Momento de inércia para a direção x para as colunas em MLC 99
Equação 27 – Largura equivalente da seção de madeira. 100
Equação 28 – Momento de inércia para a direção x para as colunas em MLCA 100
Equação 29 – Força máxima de compressão para a coluna em MLC 102
Equação 30 – Força máxima de compressão para a coluna em MLCA.....102
Equação 31 – Deslocamento máximo para viga submetida à flexão em 4 pontos..105

POSSA, Desirè Coraça; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2025. **Avaliação da resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e análise estrutural de colunas em madeira lamelada colada com reforços em aço.** Professor orientador Dr. Alfredo Petrauski. Professor coorientador Dr. Mateus Couri Petrauski.

RESUMO

A procura por construções sustentáveis tem incentivado o uso de materiais renováveis, sendo as árvores de reflorestamento uma alternativa para suprir as necessidades deste ramo da indústria. Uma das possíveis aplicações da madeira é o seu emprego em estruturas pré-fabricadas, como é o caso da madeira lamelada colada (MLC). Além dos elementos em MLC, o uso de estruturas mistas de madeira e aço tem se destacado em diversas aplicações estruturais devido à união das características de ambos os materiais. Nesse contexto, este trabalho foi desenvolvido em três investigações distintas, sendo duas relacionadas à tecnologia de adesivos aplicados em estruturas em MLC, e uma sobre a confecção e ensaio de estruturas mistas de madeira e aço. Primeiramente, avaliou-se a resistência ao cisalhamento na compressão e na torção de juntas de *Pinus* sp. coladas com adesivo poliuretano monocomponente (1C-PUR), em diferentes ângulos em relação às fibras da madeira e o emprego da fórmula de Hankinson, para estimar a resistência de juntas coladas e o percentual de falha na madeira. Na segunda parte do estudo, avaliou-se o desempenho mecânico de juntas de *Pinus* sp. coladas com adesivo epóxi Araldite, para diferentes níveis de pressão e gramatura de adesivo. Por fim, confeccionou-se e avaliou-se o desempenho estrutural, na flexão e na compressão, de colunas em MLC de *Pinus* sp., feitos com adesivo à base de resina epóxi e reforços laterais em aço, comparativamente às colunas sem os reforços. Em todos os estudos a madeira foi separada em blocos de acordo com sua densidade. No primeiro estudo, constatou-se que a resistência ao cisalhamento foi afetada pelo ângulo de colagem no ensaio de compressão. Concluiu-se também, que a fórmula de Hankinson pode ser empregada como estimadora da resistência ao cisalhamento na compressão de juntas coladas a diferentes ângulos, mas não é recomendado o seu uso para estimar a resistência ao cisalhamento na torção. Na segunda parte do estudo, observou-se que, para o adesivo epóxi, o consumo de adesivo não apresentou efeito significativo na resistência. Por outro lado, quanto maior a pressão de colagem menor foi a resistência obtida. No terceiro estudo, concluiu-se que as colunas com reforço em aço tiveram desempenho mecânico superior às colunas sem o seu uso. As estruturas em MLCA foram 5,1 vezes mais rígidas que as em MLC, na flexão. Em relação à rigidez das estruturas sob o esforço de compressão, as estruturas com reforço em aço não apresentaram maior rigidez, exceto para as unidades de baixa densidade. Porém, as colunas com aço conseguiram suportar, em média, forças 93% maiores que as unidades sem o aço.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas de madeira, Estruturas mistas, Peças comprimidas; Adesivo; Chapas de aço.

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

POSSA, Desirè Coraça; State University of West Paraná, February 2025**. Evaluation of the Resistance of Bonded Joints with Different Adhesives and Structural Analysis of Glued Laminated Timber Columns Reinforced with Steel**. Advising Professor Dr. Alfredo Petrauski. Co-advising Professor Dr. Mateus Couri Petrauski.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable construction has promoted the use of renewable materials, with reforestation wood emerging as a viable alternative for this industry. One of the possible applications of wood is in prefabricated structures, such as glued laminated timber (Glulam). Additionally, composite wood-steel structures have gained recognition in various structural applications due to the combined benefits of both materials. Within this context, this study comprises three distinct investigations: two focused on adhesive technologies applied to Glulam structures and one on the fabrication and testing of composite wood-steel structures. The first investigation analyzed the shear strength under compression and torsion of *Pinus* sp. joints bonded with single-component polyurethane adhesive (1C-PUR) at different fiber orientations. Hankinson's formula was also evaluated as a predictor of joint strength and wood failure percentage. The second study examined the mechanical performance of *Pinus* sp. joints bonded with Araldite epoxy adhesive under varying bonding pressures and adhesive grammages. Lastly, the third study assessed the structural behavior—under bending and compression—of Glulam columns made from *Pinus* sp., bonded with epoxy-based resin adhesive, and reinforced with lateral steel plates, comparing their performance to unreinforced columns. Across all studies, the wood was classified into density-based blocks. Results from the first study indicated that shear strength was affected by the bonding angle in the compression test. Additionally, while Hankinson's formula proved useful in estimating shear strength under compression for bonded joints at different angles, it was not suitable for predicting shear strength under torsion. In the second study, it was found that, for epoxy adhesive, higher bonding pressure led to reduced joint strength, whereas adhesive grammage had no significant impact. The third study revealed that steel-reinforced columns outperformed unreinforced ones in terms of mechanical performance. The composite Glulam-steel structures demonstrated 5.1 times greater stiffness in bending compared to conventional Glulam structures. However, in compression, steel reinforcement did not significantly enhance stiffness except in low-density specimens. On average, steel-reinforced columns withstood 93% higher loads than their unreinforced counterparts.

KEYWORDS: Wood structures, Composite structures; Columns; Adhesive.

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

ÍNDICE

1 CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1
1.1 INTRODUÇÃO GERAL 1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
1.2.1 Produção florestal e madeireira no Brasil 4
1.2.1.1 Indústria florestal brasileira baseada em madeira de pinus 9
1.2.2 Perspectiva de uso estrutural da madeira 10
1.2.3 Madeira lamelada colada 15
1.2.4 Adesivos 19
1.2.5 Estabilidade em barras comprimidas 21
1.2.5.1 Flambagem inelástica 26
1.2.5.2 Colunas com carregamento excêntrico 27
1.2.5.3 Dimensionamento de peças comprimidas segundo a ABNT NBR 7190: evolução normativa e critérios da versão de 2022 30
2. CAPÍTULO II. DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS COM ADESIVO 1C-PUR EM DIFERENTES ÂNGULOS 37
2.1 INTRODUÇÃO 39
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS 41
2.2.1 Confecção das juntas 41
2.2.2 Resistência ao cisalhamento 43
2.2.3 Avaliação estatística dos resultados de resistência 44
2.2.4 Percentual de falha na madeira 46
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 47
2.3.1 Resistência das juntas coladas à diferentes ângulos 47
2.3.2 Validade do modelo de Hankinson 55
2.3.3 Falha na madeira 57
2.4 CONCLUSÃO 58
3. CAPÍTULO III. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE JUNTAS COLADAS COM ADESIVO EPÓXI PARA DIFERENTES GRAMATURAS E PRESSÕES 60
3.1 INTRODUÇÃO 62
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS 63
3.2.1 Preparação das juntas coladas com adesivo epóxi 65
3.2.2 Resistência das juntas coladas 67
3.2.3 Análise estatística da resistência 68

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO....69
3.3.1 Densidade aparente e orientação dos anéis de crescimento....69
3.3.2 Resistência das juntas coladas com adesivo epóxi....71
3.4 CONCLUSÃO....79
4 CAPÍTULO IV. COLUNAS EM MADEIRA LAMELADA COLADA COM REFORÇOS EM AÇO....81
4.1 INTRODUÇÃO....83
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS....84
4.2.1. Classificação visual e densidade aparente da madeira....85
4.2.2 Caracterização da madeira....86
4.2.3 Colunas em madeira lamelada colada com reforços em aço....86
4.2.4 Confecção das colunas....89
4.2.5 Ensaio não destrutivo das colunas à flexão....91
4.2.6 Ensaio destrutivo das colunas à compressão....93
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO....96
4.3.1 Densidade aparente da madeira....96
4.3.2 Caracterização da madeira....98
4.3.3 Estimativa de força crítica das colunas....99
4.3.4 Estimativa de força conforme a NBR 7190....101
4.3.5 Rigidez das colunas à flexão....103
4.3.6 Resistência e rigidez à compressão....108
4.4 CONCLUSÃO....119
5. CAPÍTULO V: CONCLUSÕES GERAIS....121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS....123
APÊNDICES....133
APÊNDICE A....133
APÊNDICE B....137
APENDICE C....148

1 CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Diante das mudanças climáticas, a degradação do meio ambiente e todos os impactos negativos que a manutenção da espécie humana gera no planeta é de extrema importância, o debate acerca da sustentabilidade e a mitigação dos impactos causados pelo desenvolvimento humano (Torresi *et al.*, 2010; Santana e Pessoa, 2022). O desenvolvimento sustentável surge como uma necessidade global, visando garantir que as próximas gerações também possam usufruir dos recursos naturais sem anular o crescimento de um país (Nishimura *et al*., 2020).

Nesse contexto, a madeira é um material que se destaca a favor da sustentabilidade na construção civil, pois, além de ser um recurso renovável, reduz a carga ecológica negativa de uma edificação (Souza, 2010; Cury e Filho, 2011; Bissoli-Dalvi *et al.*, 2017). Ainda, a utilização de materiais renováveis em construções promove o crescimento do setor madeireiro na construção civil, principalmente, daquelas provenientes de florestas plantadas (Gomes, 2018). O aumento das florestas plantadas pode proporcionar melhorias nos indicadores macroeconômicos de bem-estar social, geração de emprego e arrecadação de impostos (Moreira *et al.*, 2016; Araujo *et al.*, 2017). A silvicultura tem potencial de ser um investimento atrativo para os produtores rurais, sendo capaz de gerar lucros semelhantes ao da agricultura (Moreira *et al.*, 2016).

Como o Brasil apresenta alta capacidade de expansão no setor de florestas plantadas, há um grande potencial para ampliar o uso de sistemas construtivos em madeira no país (Moreira *et al.*, 2016). No entanto, esse crescimento depende de investimentos e de pesquisas que permitam à madeira competir com outros materiais utilizados no mercado da construção civil (Gomes, 2018). Segundo o *Canadian Wood Council* (2004), o potencial de aquecimento global, o índice de emissões no ar e na água e o consumo de energia são mais elevados para as construções de aço e de concreto que para a construção de madeira.

Além disso, a madeira é um material que requer pouca energia para o seu processamento, ajuda na redução do efeito estufa e possui boas características de isolamento térmico e elétrico. Outro aspecto relevante é que o uso da madeira em

construções mantém o carbono, capturado da atmosfera, armazenado na estrutura da madeira (Souza e Demenighi, 2017; Shigue, 2018).

Embora a utilização da madeira como material estrutural sofra preconceito no Brasil, países da Europa e América do Norte empregam a madeira há anos e isso teve grande influência na evolução das técnicas e desenvolvimento dessas estruturas. Com isso, surgem novos métodos construtivos, como os sistemas pré-fabricados em madeira, que podem ser empregados em diversos projetos arquitetônicos (Pfeil e Pfeil, 2003; Cordeiro Jr. *et al.*, 2017).

Há diversas soluções tecnológicas dentro do mercado de pré-fabricação de estruturas de madeira, sendo uma das principais a Madeira Lamelada Colada - MLC (Cordeiro Jr. *et al.*, 2017). A MLC é um produto estrutural produzido a partir da junção de lamelas de madeira com adesivo que possibilita a execução de peças com maiores dimensões e diversas geometrias, sendo recomendada para qualquer tipologia construtiva.

Com a crescente busca por materiais sustentáveis, junto com a consolidação das novas tecnologias, nos últimos anos surgiu uma tendência aos segmentos madeireiros e ao mercado de adesivos para a adesão da madeira (Oliveira, 2010). Assim, o estudo do desempenho mecânico de juntas coladas em diferentes espécies de madeira empregando adesivos variados é essencial para compreender a influência das condições de colagem na resistência das juntas (Oliveira e Seraphim, 2015).

Além das estruturas em MLC, o uso de reforços em aço tem sido estudado com o intuito de aumentar a resistência e/ou rigidez desses elementos colados (De Luca e Marano, 2012; Yang *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021). Esses estudos evidenciaram o grande potencial da utilização de elementos em aço para melhorar o desempenho mecânico das estruturas em MLC, técnica conhecida como Madeira Lamelada Colada Armada (MLCA). Outra vantagem em relação à união desses dois materiais é a possibilidade de inserir o reforço em aço durante a mesma fase produtiva da colagem das lamelas de madeira, utilizando inclusive o mesmo adesivo.

Nesse contexto, o presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas distintas: o estudo de adesivos e parâmetros de colagem para obtenção de melhores desempenhos mecânicos em juntas de madeira colada e, posteriormente, a confecção e ensaio de colunas feitas em MLC com reforços laterais em aço comparativamente a colunas sem reforços. Esta tese foi dividida em cinco capítulos, sendo que o Capítulo I, apresenta as considerações iniciais, enquanto os Capítulo II, III e IV detalham as

pesquisas desenvolvidas. Por último, o Capítulo V expõe as conclusões gerais da pesquisa.

No Capítulo II, a pesquisa buscou avaliar o desempenho mecânico de juntas coladas em diferentes ângulos em relação às fibras da madeira, utilizando a madeira de *Pinus* sp. e adesivo poliuretano monocomponente. Foram realizados ensaios de cisalhamento na compressão e na torção, abrangendo nove ângulos distintos, de 0° a 90° com avaliação da resistência e falha na madeira. Além disso, o estudo avaliou o emprego da fórmula de Hankinson para estimar a resistência ao cisalhamento. O objetivo principal foi verificar se a resistência era influenciada pelo ângulo de colagem e o tipo de ensaio. As evidências obtidas na literatura indicam que o desempenho mecânico destas juntas é similar e independeria do adesivo ou espécie de madeira. Nesta lógica é possível que esta pesquisa confirme estas expectativas. Este capítulo já foi publicado na Revista Árvore, na edição de outubro de 2024.

No Capítulo III, o estudo investigou o desempenho mecânico de juntas coladas de *Pinus* sp. utilizando adesivo epóxi, comercialmente conhecido como Araldite Profissional, com o intuito de analisar se a resistência era influenciada pela pressão de colagem e pela gramatura de adesivo. A pesquisa explorou quatro níveis de pressão (0,6 a 1,2 MPa), e seis níveis de consumo de adesivo (80 a 350 $g.m^{-2}$), para identificar as possíveis combinações que garantiriam uma colagem de máximo desempenho. Considerando a importância dessas variáveis no processo de fabricação de estruturas em MLC, o estudo visou fornecer orientações para a aplicação deste adesivo epóxi em estruturas de madeira, buscando orientar o uso do adesivo e garantir a eficiência do processo de colagem.

Por fim, no Capítulo IV, o estudo concentrou-se na confecção e avaliação do desempenho estrutural de colunas em MLC com reforços laterais em aço, comparativamente a colunas sem reforços. O objetivo principal foi verificar se a adição das chapas de aço aumentaria a resistência e/ou a rigidez das colunas, tanto sob esforço de flexão quanto de compressão. As colunas foram projetadas considerando o índice de esbeltez máximo permitido pelo ABNT NBR 7190:2022. Este estudo buscou compreender se o aço e a madeira poderiam trabalhar de forma solidária e se o aço melhoraria o desempenho das estruturas em MLC, especialmente em casos que demandam maior capacidade de carregamento e estabilidade.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são discutidos os conceitos fundamentais para compreender a importância da utilização de sistemas estruturais em madeira.

1.2.1 Produção florestal e madeireira no Brasil

O termo desenvolvimento sustentável foi descrito em 1987, no Relatório de *Brundtland*, pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – WCED. Este documento estabelece que o desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazerem as suas próprias necessidades, devendo considerar a sustentabilidade ambiental, econômica e sociopolítica (WCED, 1987).

Após esta reunião começou a ocorrer uma mudança de paradigma em relação às políticas públicas, tendo como um dos focos principais a preocupação com o meio ambiente, iniciando a difusão dos conceitos de desenvolvimento sustentável. A partir de 1992, este conceito tornou-se mais sólido, sendo o Brasil um dos 179 países que assinaram o documento Agenda 21 na Rio 92, um instrumento de comprometimento internacional voltado para o desenvolvimento sustentável (Malheiros *et al.*, 2008; Santos e Medeiros, 2020).

Nesse cenário, a madeira se destaca como um material sustentável, pois, além de ser um recurso renovável, as madeiras que possuem certificados provêm de reflorestamento, contribuindo para a preservação de florestas nativas (Bissoli-Dalvi *et al.*, 2017).

Diversos setores têm como base o beneficiamento de matérias-primas florestais, como as indústrias de celulose e papel, movelaria, painéis derivados, estruturas, energia de biomassa, utensílios domésticos, serrados, aproveitamento de resíduos, etc. (Araujo *et al.*, 2017). Esses produtos florestais são obtidos a partir de florestas plantadas (silvicultura) e, quando em florestas nativas, do extrativismo (Miura e Sousa, 2022).

O aumento das florestas plantadas, principalmente aquelas destinadas ao uso múltiplo, pode proporcionar melhorias nos indicadores macroeconômicos de bem-estar social, geração de emprego e arrecadação de impostos, além de auxiliar regiões

que possuem extensas áreas degradadas convertendo-as em plantios florestais (Moreira *et al.*, 2016; Araujo *et al.*, 2017).

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2023), em 2022, a cadeia produtiva florestal arrecadou R$ 260 bilhões do valor bruto da produção e gerou mais de 2,6 milhões de empregos diretos e indiretos. Além disso, este setor possui grande importância na redução dos impactos das mudanças climáticas, sendo que em 2021, as florestas plantadas estocaram cerca de 1,79 bilhão de toneladas de CO_2 equivalente (IBÁ, 2022).

Em 2022, a área designada para a plantação de árvores no Brasil totalizou 9,94 milhões de hectares, sendo o eucalipto a principal cultura, ocupando aproximadamente 7,6 milhões de hectares, seguido pelo pinus, com cerca de 1,93 milhão de hectares (Figura 1). Além desses cultivos, existia cerca de 500 mil hectares referente ao plantio de outras espécies, como a seringueira, a teca e a acácia (IBÁ, 2023).

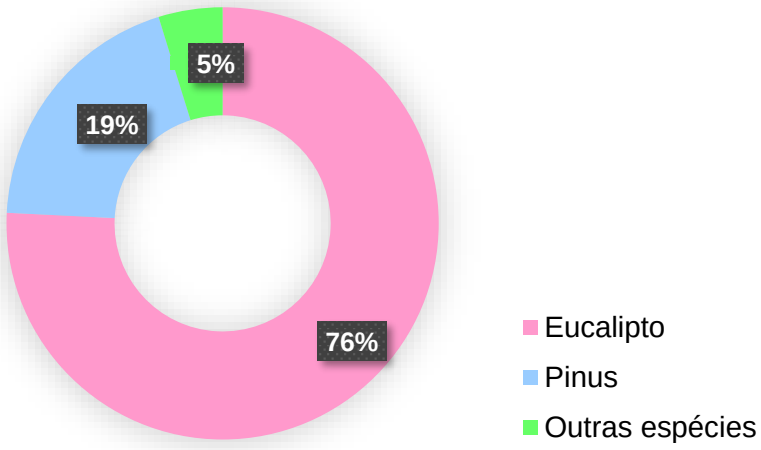


Figura 1 – Percentual da área de árvores plantadas por espécie no ano de 2022.

Fonte: Indústria Brasileira de Árvores, 2023.

O setor florestal brasileiro contava com cerca de 183 mil empresas/empreendimentos em 2018, tanto de florestas nativas quanto de plantadas, sendo que as regiões Sul e Sudeste concentram a maior parte dessas empresas, com 40,3 mil e 57,8 mil empresas, respectivamente (ABIMCI, 2019).

A silvicultura pode ser um investimento atrativo para os produtores rurais, sendo capaz de gerar lucros semelhantes ao da agricultura, desde que tenha um bom planejamento antes da sua implantação (Moreira *et al.*, 2016). Segundo Valverde *et al.* (2012), esse setor caracteriza-se pela diversidade de produtos, podendo ser dividida em três cadeias produtivas: madeira industrial (celulose, papel e painéis de madeira), processamento mecânico da madeira (serrados e compensados) e madeira para energia (lenha, cavaco e carvão vegetal).

Em 2021, o valor da produção florestal atingiu o recorde de R$ 30,1 bilhões, sendo que a silvicultura foi a grande responsável por esse valor, alcançando R$ 23,8 bilhões (IBGE, 2022). É possível visualizar na Figura 2, que os produtos que tiveram maior participação nos valores de produção na silvicultura foram a madeira em tora, que gerou R$ 13,54 bilhões, seguido pelo carvão vegetal, com R$ 6,58 bilhões.

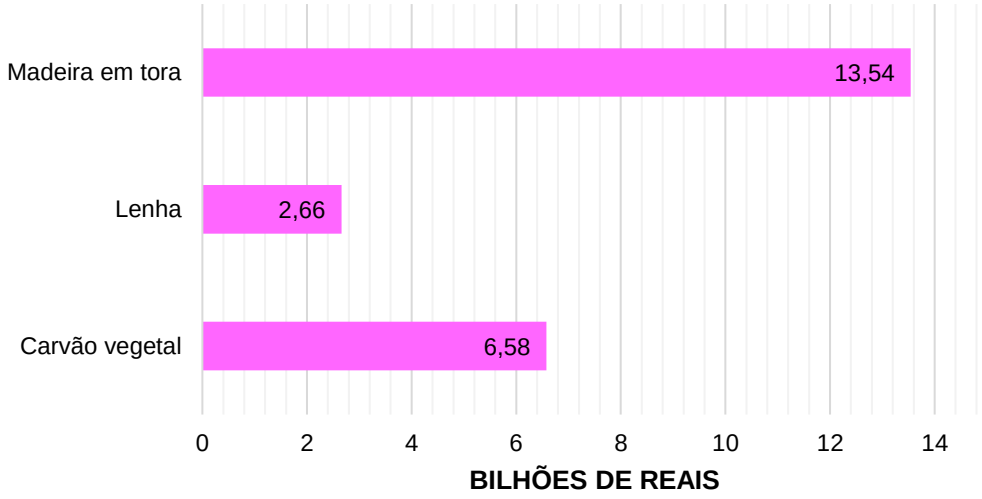


Figura 2 – Participação dos valores de produção na silvicultura em 2021.

Fonte: IBGE, 2022.

Por conta das funções ecossistêmicas de suas florestas, o Brasil é uma das maiores potências mundiais no fornecimento de produtos florestais madeireiros (PFM), e não-madeireiros (PFNM), e de serviços ambientais (Valverde *et al.*, 2012). O Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima- MMA (2023), define produtos florestais madeireiros (Tabela 1), como todo material lenhoso de origem vegetal e produtos florestais não-madeireiros (Tabela 2), como os produtos não-lenhosos de origem vegetal.

Tabela 1 – Principais exemplos de produtos florestais madeireiros

Materiais/Áreas	**Exemplos de aplicações**
Agricultura	Estacas, escoras, cercas, palha de forração
Artes e tecelagem	Cavaletes, telas, esculturas, teares, agulhas
Artigos funerários	Urnas mortuárias, caixões, adornos
Compósitos derivados de madeira	Painéis de lascas, lâminas, fibras e partículas
Construtivos estruturais	Pilares, vigas, caibros, montantes, escadas
Construtivos não estruturais	Esquadrias, cercas, forros, pisos, *decks*
Construtivos provisórios	Cunhas, pinos, fôrmas, escoras, estacas
Embalagens	Pallets, caixas, caixotes, contêineres
Esportivos	Tacos, bastões, mesas, arcos, flechas
Ferramentas e cabos de apoio	Vassouras, pincéis, martelos, enxadas
Instrumentos medicinais	Muletas, bengalas, tabuleiros, fisioterápicos
Instrumentos musicais	Violões, violas, flautas, harpas, batutas
Movelaria	Mesas, estantes, armários, camas, baús
Náuticos	Píer, embarcações, canoas, remos, mastros
Objetos	Relógios, lixeiras, abajures, biombos, castiçais
Palitos	Palitos de dente, sorvete, fósforo, espetos
Recipientes para alimentos	Tinas, corotes, barris, polões, gamelas

Fonte: Araujo *et al.*, 2017.

Tabela 2 – Principais exemplos de produtos florestais não-madeireiros

Materiais/Áreas	**Exemplos de aplicações**
Alcatrão	Preservativos de madeira (creosoto)
Cascas	Taninos, rolhas, substratos, biomassa
Celulose	Fibra de celulose, papel, papelão, *rayon*
Estruturas fibrosas vegetais	Bambu, vime, ráfia, palhas de cereais
Extrativos (folhas, lenho, etc.)	Ceras, borracha, gomas, solventes, óleos, tintas
Frutos	Alimentícios, medicinais
Sementes, folhas e flores	Óleos essenciais, alimentícios, medicinais
Subprodutos de processos químicos	Combustíveis (etanol celulósico, metanol, etc.)
Subprodutos florestais para biomassa	Briquetes, *pellets*, carvão vegetal, particulados

Fonte: Araujo *et al.*, 2017.

Para atingir as três dimensões da sustentabilidade (econômica, social e ambiental), o manejo sustentável dos PFM e PFNM é de extrema importância. Esse processo auxilia na redução dos impactos sobre a biodiversidade, comparando-se a outros usos da terra, e auxilia na capacidade de geração de empregos e renda no campo (Roma e Andrade, 2013).

A Década das Nações Unidas da Restauração de Ecossistemas foi instituída de 2021 a 2030, com o objetivo de combater as mudanças climáticas, conservar os serviços ecossistêmicos/ambientais e informar sobre a fome, pobreza e a redução da biodiversidade (PNUMA e FAO, 2020). É possível realizar a restauração ecológica através do recobrimento de áreas degradadas em áreas de preservação permanente e de reserva legal, por intermédio de sementes e mudas, ou com o isolamento da região por cercas. A restauração ecológica consegue promover e conservar serviços ambientais e ecossistêmicos, possui a capacidade de aumentar a disponibilidade de PFM e PFNM, de acordo com o conjunto de espécies utilizadas e das técnicas de manejo.

Tratando-se da utilização de PFM na construção civil, a associação das categorias de componentes construtivos estruturais, não estruturais e provisórios podem gerar outra categoria de maior amplitude, a de estruturas em madeira (Araujo *et al.*, 2017). A madeira tem sido utilizada pela humanidade há séculos como material para abrigo e proteção contra intempéries, sendo inicialmente empregada de maneira rudimentar (Almeida *et al.*, 2013).

O crescimento do setor florestal e da sustentabilidade, que é atrelada ao seu desenvolvimento, auxilia na adoção de programas de certificação florestal. Essas certificações florestais são consideradas como um importante instrumento para demonstrar o valor reputacional de uma organização para o mercado, pois buscam garantir o cumprimento de padrões internacionalmente reconhecidos. Em 2022, a área plantada certificada no Brasil totalizou em 5,2 milhões de hectares, um aumento de cerca de 29% em relação a 2021 (IBÁ, 2023).

O crescente interesse por construções sustentáveis tem incentivado o uso da madeira como material principal na construção civil, especialmente em espécies provenientes de reflorestamento (Cordeiro Jr. *et al.*, 2017). No Brasil, a ampla disponibilidade de florestas plantadas oferece um grande potencial para expandir os sistemas construtivos em madeira (Moreira *et al.*, 2016). No entanto, esse crescimento

está condicionado a investimentos e pesquisas que permitam à madeira competir com outros materiais amplamente utilizados no mercado construtivo (Gomes, 2018).

1.2.1.1 Indústria florestal brasileira baseada em madeira de pinus

No Brasil, espécies de Pinus vêm sendo cultivadas há mais de um século. Imigrantes europeus trouxeram grande parte delas para a produção em madeira e para fins ornamentais (Shimizu, 2008). Através do programa de incentivo fiscal durante as décadas de 1970 e 1980, as plantações florestais de *Pinus* se estabeleceram no Brasil, propiciando um aumento na oferta de madeira que, posteriormente, se caracterizou como um fator de influência no avanço da indústria florestal brasileira (Vasques *et al.*, 2007).

No sul do Brasil, o reflorestamento com o gênero *Pinus* prevê um período de longo prazo, proporcionando desenvolvimento social e econômico em extensão regional. Este setor tem grande atuação na economia nacional, demonstrando ser uma atividade economicamente viável, ambientalmente correta e com impacto social positivo (Vasques *et al.*, 2007; Shimizu, 2008).

A região sul do Brasil em 2022, manteve sua posição como principal produtora de *Pinus*, representando 89% dos 1,9 milhão de hectares de área destinada ao cultivo da espécie. O estado com a maior extensão plantada é o Paraná, com 713 mil hectares, seguido por Santa Catarina, com 701 mil hectares plantados, conforme ilustrado na Figura 3. No Brasil, em 2022, a produtividade do pinus foi estimada em 30,9 m³/ha/ano (com casca), com 16,3 anos de duração média (IBÁ, 2023).

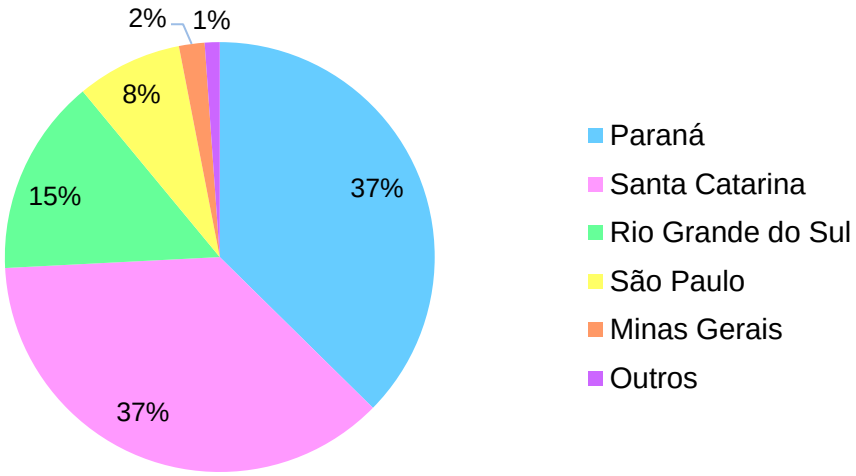


Figura 3 – Participação da área plantada com árvores de pinus por estado, em 2022.

Fonte: Indústria Brasileira de Árvores, 2023.

A silvicultura do gênero *Pinus* tem como foco a produção da madeira em toras para utilização na cadeia produtiva da madeira, o que reduziu consideravelmente o impacto ambiental da pressão sobre as formações florestais nativas. A exploração florestal é incentivada pela demanda de produtos de madeira, porém, com a expansão da base de reflorestamento e o manejo adequado, o processo produtivo direcionado por técnicas assegura a sustentabilidade no atendimento das demandas, propiciando o uso da madeira sem atingir as formações de florestas naturais (Vasques *et al.*, 2007).

O cultivo de espécies do gênero *Pinus* em florestas produtivas e reflorestamentos, também contribui para a conservação do solo, como cultura de longo prazo e como atividade de baixo impacto ambiental (Vasques *et al.*, 2007).

1.2.2 Perspectiva de uso estrutural da madeira

A madeira é, tradicionalmente, um dos principais materiais empregados em todas as etapas da construção civil e, quando proveniente de florestas plantadas, favorece o desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil, pois reduz a carga ecológica negativa de uma edificação (Souza, 2010; Cury e Filho, 2011).

Além disso, a madeira pode ser aplicada na construção de habitações e em estruturas em diversos países, porém no Brasil, esse material não tem sido devidamente explorado. Normalmente, seu uso no país é provisório, servindo em andaimes e formas de escoramento para concreto (Shigue, 2018).

Embora, houvesse iniciativas ao longo dos anos com o intuito de introduzir tecnologias construtivas para o emprego da madeira no Brasil, elas se mostraram pontuais e incapazes de impulsionar a sua utilização como uma matéria-prima comum no cenário da construção civil (Shigue, 2018). Os principais fatores que limitam tal emprego são as restrições de natureza histórico-cultural, a falta de mão de obra qualificada e o desconhecimento das espécies e de suas propriedades, o que acaba reforçando a imagem pejorativa associada à madeira (Pedreschi *et al.*, 2005; Shigue, 2018).

Para promover a utilização da madeira como material construtivo é necessário instruir o mercado consumidor sobre os benefícios e qualidades do material e apresentar exemplos de bons projetos. Outro fator importante é qualificar a mão de obra na cadeia produtiva para proporcionar o melhor aproveitamento do material e redução de desperdício (Shigue, 2018).

Assim, as propriedades que tornam a madeira atraente no aspecto ambiental podem ser ressaltadas frente a outros materiais da construção; visto que é um material que necessita de pouca energia para o seu processamento, ajuda na diminuição do efeito estufa e tem boas características de isolamento térmico e elétrico. Além disso, a utilização da madeira em construções retém o dióxido carbônico capturado pelas árvores, armazenando-o em sua estrutura (Souza e Demenighi, 2017; Shigue, 2018).

O *Canadian Wood Council* (2004), realizou a avaliação ambiental completa de três projetos para uma casa unifamiliar com cerca de 220 m², construída no mercado de Toronto durante os primeiros 20 anos de sua vida útil. O estudo considerou um projeto usando estrutura de madeira, o segundo projeto incorpora estrutura de aço e o terceiro utiliza um sistema construtivo em ICF (*Insulated Concrete Forms*), e um sistema de laje em estrutura mista de concreto e aço (*HAMBRO Composite Floor System*). Os resultados da avaliação estão resumidos na Figura 4. Note que o potencial de aquecimento global, o índice de emissões no ar, o índice de emissões na água e o consumo de energia são mais elevados para as construções de aço e de concreto que para a construção de madeira.

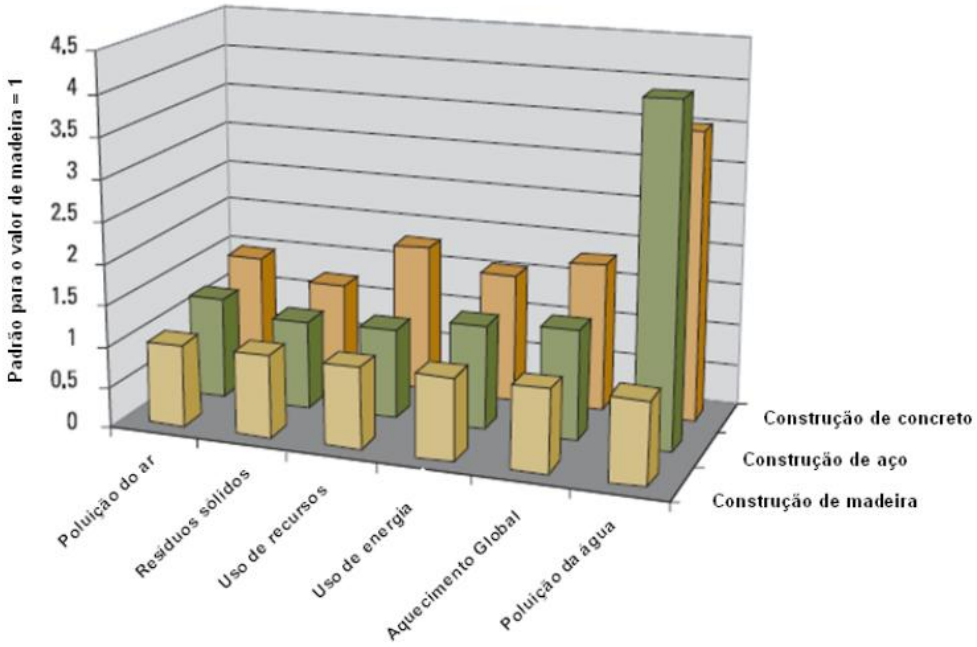


Figura 4 – Índices de impactos ambientais de construções de aço, concreto e madeira.

Fonte: Canadian Wood Council, 2004.

Comparando esses resultados gerais em relação ao projeto de madeira, o *Canadian Wood Council* constatou que os projetos de aço e concreto consomem 12 a 20% a mais de energia; emitem 15 a 29% mais gases de efeito estufa; liberam 10 a 12% a mais de poluição do ar; poluem a água 3 a 2,25 vezes mais; usam 7 a 50% mais recursos de uma perspectiva de uso ponderado de recursos e produzem 6 a 16% mais resíduos sólidos, respectivamente (CWC, 2004).

A baixa densidade da madeira é outra contribuição positiva atrelada ao seu uso, pois estruturas mais leves tendem a reduzir os custos relacionados a transportes e fundações (Shigue, 2018). Comparando-se ao aço e ao concreto, a madeira apresenta uma relação resistência/densidade três vezes maior que para o aço e dez vezes maior que para o concreto (Calil Jr. e Dias, 1997).

A madeira utilizada em estruturas apresenta tanto vantagens quanto desvantagens, assim, como ocorre com outros materiais estruturais. A Tabela 3, relaciona as vantagens e desvantagens do emprego da madeira em estruturas de edificações.

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens da utilização da madeira em estruturas

Principais vantagens	Possíveis desvantagens
- Renovável e abundante na natureza	- Variação dimensional devido a variação da umidade
- Elevada resistência em relação a sua baixa massa específica	- É combustível, principalmente elementos de pequenas dimensões
- Baixa demanda de energia para produção	- Composição bastante heterogênea e anisotrópica
- Facilidade de trabalho e união de peças	- Relativamente suscetível ao ataque de insetos e agentes internos
- Inerte, até em exposição a ambientes químicos	- Por vezes possui formas que limitam sua utilização
- Excelente isolante térmico e acústico	
- Pode ser reempregada várias vezes	

Fonte: Souza, Rodrigues e Mascia, 2008.

Segundo Cordeiro Jr. *et al.* (2017), as pesquisas relacionadas às estruturas de concreto armado e de aço tiveram grandes investimentos de empresas, que passaram a utilizar predominantemente esses materiais, colocando a madeira em segundo plano. Associado a isso, há um preconceito com o emprego da madeira por causa de algumas características físicas e fisiológicas, como a inflamabilidade, a capacidade de apodrecimento e a suscetibilidade a ataque de organismos xilófagos (Figueroa e Moraes, 2009; Cordeiro Jr. *et al.*, 2017).

Em relação a inflamabilidade, a madeira quando exposta ao fogo age como combustível, porém, assim que a sua camada externa carboniza, ela começa a se comportar como um isolante térmico. Essa camada externa carbonizada retém o efeito do incêndio impedindo que o mesmo chegue a sua estrutura interna, conforme o esquema ilustrado na Figura 5 (Figueroa e Moraes, 2009; Cordeiro Jr. *et al.*, 2017).

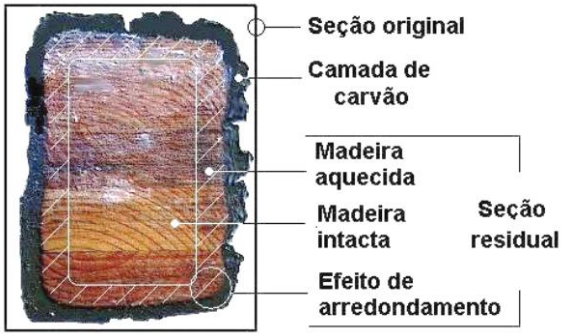


Figura 5 – Esquema do isolamento obtido pela carbonização das camadas mais externas da madeira.

Fonte: Cordeiro Jr *et al.*, 2017.

Tratando-se da suscetibilidade a ataque de organismos, há tratamentos disponíveis que podem combater esses danos de forma eficaz, resultando em estruturas duráveis e com características estéticas agradáveis (Pfeil e Pfeil, 2003; Cordeiro Jr. *et al.*, 2017).

As madeiras utilizadas em construção são caracterizadas em madeiras duras ou madeiras macias. As madeiras duras são provenientes de árvores frondosas, de crescimento lento e apresentam melhor qualidade, já as madeiras macias são provenientes em geral das árvores coníferas de crescimento rápido (Pfeil e Pfeil, 2003).

Por conta do processo de crescimento da árvore, a madeira apresenta a orientação das células em três direções principais. Isso acarreta numa anisotropia do material que afeta diretamente suas propriedades físicas e mecânicas. Na Figura 6 são indicados os diferentes planos da madeira e suas respectivas nomenclaturas, sendo estes tangencial, transversal e radial. Ainda, há o plano longitudinal que é designado para a direção paralela às fibras. Na prática não existe diferença significativa nas propriedades entre as direções radial e tangencial, assim, é necessário avaliar as suas propriedades na direção paralela e perpendicular às fibras (Pfeil e Pfeil, 2003; Cruz e Nunes, 2005).

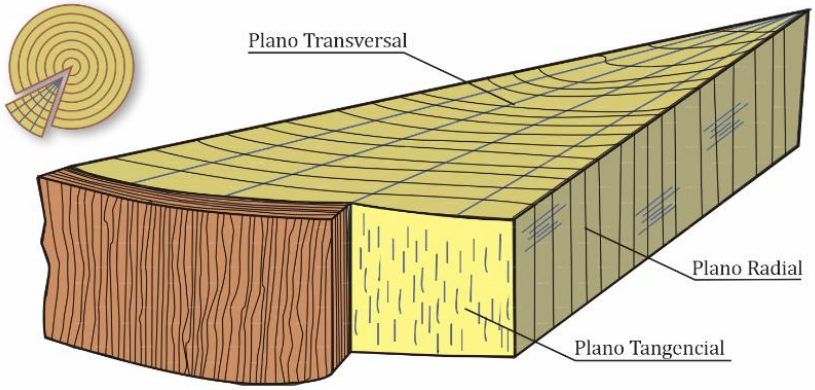


Figura 6 – Planos de corte da madeira: transversal, radial e tangencial.

Fonte: Mady, 2017.

1.2.3 Madeira lamelada colada

O estudo contínuo da utilização da madeira para fim estrutural levou ao aperfeiçoamento do uso deste material, diversificando seus produtos, sistemas construtivos e aplicações. A madeira é um dos materiais mais utilizados na construção, principalmente em edificações habitacionais, em vários países da Europa, Ásia e América do Norte (Shigue, 2018).

Ao longo dos anos, o emprego da madeira foi de extrema importância para a evolução das técnicas de manipulação e para o desenvolvimento das construções de abrigos e estruturas. Com isso, surgiram novos métodos construtivos, como os sistemas pré-fabricados em madeira, que propiciam soluções para diferentes necessidades e permitindo a construção em locais antes considerados inacessíveis, podendo ser empregados em diversos projetos arquitetônicos (Cordeiro Jr. *et al.*, 2017).

Há diversas soluções tecnológicas dentro do mercado de pré-fabricação de estruturas de madeira. Nesse contexto, a MLC é um produto estrutural fabricado a partir de lamelas de madeira selecionadas, posicionadas para que as suas fibras se encontrem em paralelo entre si, e fixadas com adesivo sob pressão que pode variar de 0,7 a 1,5 MPa (Pfeil e Pfeil, 2003). Segundinho *et al.* (2013), afirmam que uma das vantagens da MLC é que a união de peças de madeira de dimensões menores possibilita um melhor aproveitamento para a construção de peças estruturais.

A MLC existe há mais de um século. Em 1901, o mestre-carpinteiro alemão Otto Hetzer, patenteou vigas retas e no ano de 1906 fez o patenteamento de vigas

curvas. Em ambos os casos, as vigas eram compostas por lamelas de espessura pequena unidas por meio de um adesivo à base de caseína. Essa técnica, o sistema Hetzer como ficou conhecido, se difundiu primeiramente em países europeus vizinhos e ganhou prêmios por apresentar viabilidade de execução de grandes vãos (Shigue, 2018).

Na Europa e na América do Norte, a MLC é um produto estrutural indispensável. As lamelas têm a sua espessura variando de 1,5 a 3 cm, e podem ser unidas com cola nas extremidades, produzindo peças com um grande comprimento (Pfeil e Pfeil, 2003). Na Figura 7 são ilustrados os dois elementos básicos de uma peça em MLC de laminação horizontal.

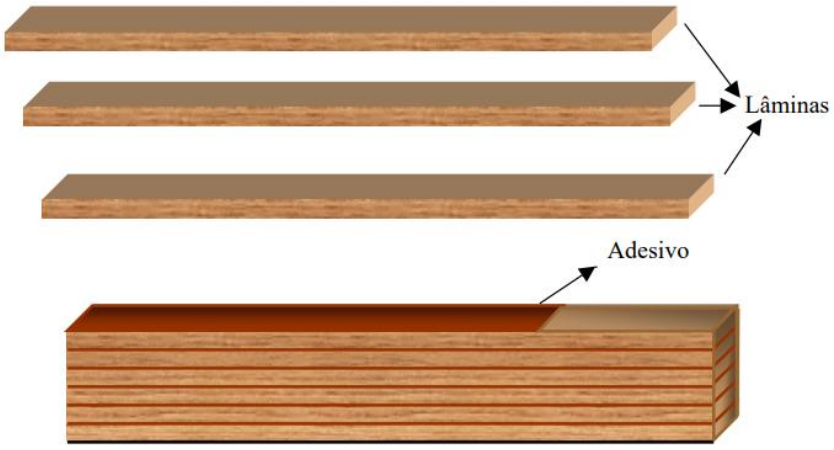


Figura 7 – Esquema de uma viga em MLC.

Fonte: Zangiácomo, 2003.

Esse material pode ser utilizado em estruturas de cobertura, torres de transmissão, edifícios, embarcações, elementos estruturais principais para pontes, banzos de escadas e corrimões, equipamentos decorativos em relevo ou planos, esquadrias e móveis. Esta grande variedade de aplicações se deve ao fato da MLC ser viável para uma grande diversidade de formas e por possuir alta resistência a solicitações mecânicas em comparação ao seu próprio peso relativamente baixo (Zangiácomo, 2003).

Normalmente, as etapas de fabricação de peças em MLC, constituem na secagem e preparo das lamelas, execução de juntas de emendas, colagem sob pressão, acabamento e tratamento preservativo (Pfeil e Pfeil, 2003).

Como as lamelas podem ser emendadas ao longo do comprimento da peça, pode-se afirmar que as dimensões das peças de MLC, só são limitadas pela capacidade dos processos de manufatura e dos sistemas de transporte (Zangiácomo, 2003; Miotto, 2009).

Em relação à madeira serrada, a MLC viabiliza uma grande variedade de formas e efeitos arquitetônicos e reduz a influência de defeitos típicos de peças com grandes dimensões. Assim, pode-se empregar peças de qualidade inferior em zonas menos solicitadas e peças de melhor qualidade em zonas mais solicitadas. Ainda, a MLC apresenta maior resistência e rigidez, devido à dispersão dos defeitos no volume da peça, tornando-a mais homogênea (Pfeil e Pfeil, 2003; Miotto, 2009).

Devido às seções transversais mais avantajadas, as peças em MLC possuem bom desempenho sob a ação do fogo e elevada resistência aos agentes corrosivos. Porém, a MLC apresenta um custo superior ao da madeira serrada por conta do seu processo de fabricação, exigência de equipamentos e mão-de-obra especializada (Zangiácomo, 2003; Miotto, 2009).

Ao contrário de estruturas de madeira maciça, as peças estruturais em MLC podem atingir grandes comprimentos através da execução de emendas entre as lamelas. Conforme Aprilanti (2010), as lamelas podem ser organizadas de forma perpendicular ou paralelas ao carregamento da viga, sendo possível utilizar emendas longitudinais e transversais para alcançar o comprimento e a largura desejados (Figura 8).

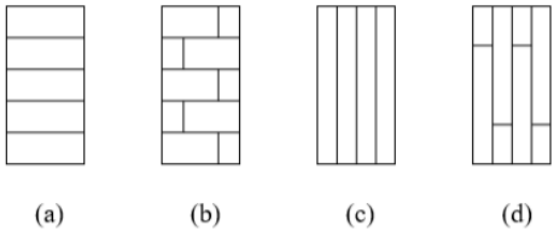


Figura 8 – Laminação horizontal sem emendas transversais (a) e com emendas transversais (b), laminação vertical sem emendas transversais (c) e com emendas transversais (d).

Fonte: Aprilanti, 2010.

As emendas são um ponto importante em estruturas em MLC, podendo ser executadas de acordo com o ilustrado na Figura 9, em que t é a espessura da lamela e l é o comprimento do chanfro. Geralmente, as emendas são distribuídas ao longo da peça de forma desordenada, conforme apresentado na Figura 9(a). Em relação à junta em chanfro, a sua eficiência depende da inclinação do corte, quanto maior a inclinação maior será a resistência mecânica. Ainda, as emendas dentadas são mais eficientes do que as emendas com chanfro (Pfeil e Pfeil, 2003).

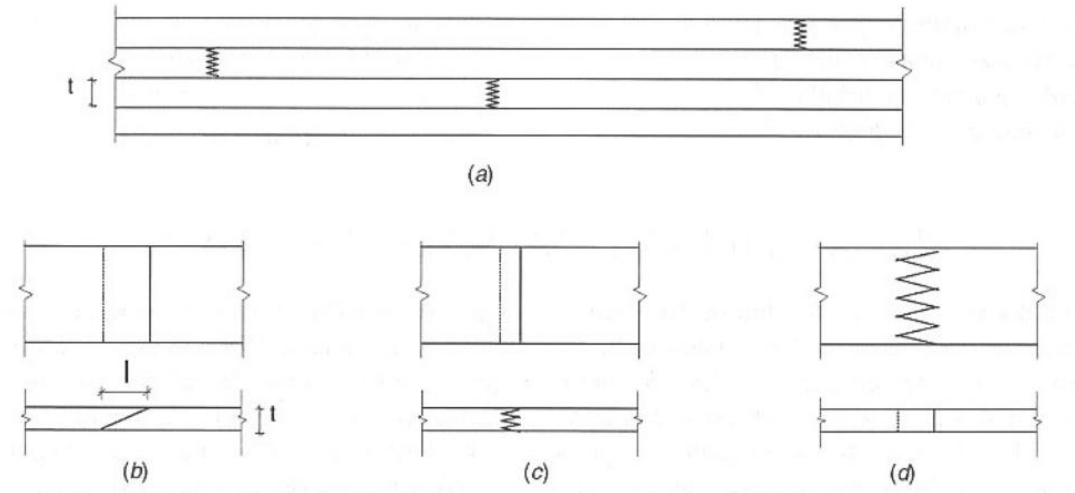


Figura 9 – Detalhes de emendas de lâminas: (a) distribuição das emendas na direção longitudinal; (b) junta por corte em chanfro; (c) emenda dentada vertical; (d) emenda dentada horizontal.

Fonte: Pfeil e Pfeil, 2003.

Os mesmos fatores que afetam a resistência de estruturas em madeira maciça também se aplicam em elementos de MLC. A espécie de madeira define suas características físicas e anatômicas e influencia diretamente as propriedades mecânicas (Aprilanti, 2010; Bianche, 2014). Quanto à ligação adesiva, a escolha do adesivo adequado depende principalmente, das condições do ambiente em que o elemento estrutural será utilizado, como o teor de umidade e a temperatura (Miotto, 2009).

1.2.4 Adesivos

A pesquisa da resistência de colagem em diferentes espécies de madeira, empregando adesivos variados, tem relevância para compreender a influência das condições na resistência de colagem, sob circunstâncias de umidade, temperatura e procurando alternativas de espécies de madeira para realizar os ensaios de classificação dos adesivos (Oliveira e Seraphim, 2015).

Frihart (2005), define que a resistência do adesivo é a força necessária para separar os substratos que estão colados. Esta resistência mecânica é vinculada às ligações primárias e secundárias da cadeia do polímero do adesivo, da madeira e da interface madeira-adesivo (Lopes *et al.*, 2013). Um adesivo possui a capacidade de unir materiais por meio de forças de adesão e coesão, podendo apresentar resistência a elevadas temperaturas ou a variação de temperatura, forças mecânicas, gases, solventes e radiação (Scott, 1990).

O processo de colagem da madeira se dá por meio de um fenômeno físico-químico chamado de adesão. Esse é um mecanismo de interação entre duas superfícies sólidas, a aderente e a adesiva, que tem a capacidade de manter unidos outros materiais em sua superfície. Além de aderir dois substratos, o adesivo tem papel de fluir e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, promovendo interações entre o adesivo e o substrato (Bianche *et al.*, 2017).

Já a coesão refere-se à atração das moléculas ou átomos de uma mesma substância, representando a força interna dos adesivos que é responsável por manter as partículas unidas (Gossler, 2020). A Figura 10, ilustra a atuação de cada uma das forças em um sistema de dois substratos unidos por meio de adesivo.

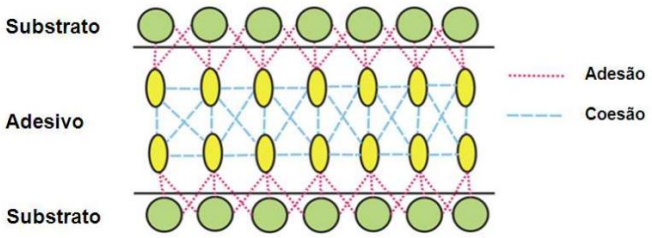


Figura 10 – Ilustração representativa das forças de adesão e coesão entre substrato e adesivo.

Fonte: Marques, 2009.

Existem uma série de fatores que interferem na adesão entre os componentes da madeira e outros materiais, sendo estes relacionados às propriedades físico-químicas do adesivo, à classificação do adesivo, à estratégia utilizada na etapa da colagem das juntas e na preparação do substrato, às condições em que as juntas adesivas serão expostas e à geometria da peça (Pizzi, 1994; Oliveira e Seraphim, 2015).

Os mecanismos de adesão mais relevantes são a adesão mecânica e a adesão química. A adesão mecânica se dá em superfícies porosas, onde o adesivo endurecido se entrelaça tanto na junta de colagem quanto nos poros do aderente. A adesão química se dá a partir de forças básicas que envolvem as ligações químicas primárias entre o adesivo e o aderente (Azevedo, 2009).

As condições físicas e químicas da superfície são importantes para uma colagem. O adesivo deve ter uma viscosidade adequada para umedecer e espalhar no substrato sob a aplicação de uma pressão que promova uma adesão de qualidade (Santiago *et al.*, 2018). Além do papel importante do adesivo na produção de produtos à base de madeira e seus derivados, o adesivo pode representar até 50% do custo total do produto (Varanda *et al.*, 2018).

Alguns adesivos apresentam maior ductilidade na linha de adesão; como os adesivos poliuretanos, acarretando uma baixa porcentagem de falha na madeira. O contrário é observado para adesivos rígidos frágeis, onde a deformação ocorre principalmente na estrutura da madeira (Lehringer e Gabriel, 2014).

A porosidade e a ação de penetração de adesivos na estrutura lenhosa possuem uma relação inversa com a densidade da madeira, ocorrendo uma maior penetração do adesivo em madeiras de baixa densidade. Assim, é possível ocasionar em uma linha de cola “faminta”, ou seja, pouca quantidade de adesivo na linha de cola. De modo contrário, madeiras com densidade alta exibem baixa permeabilidade ao adesivo o que pode ocasionar em uma linha de cola espessa, superficial e com menor resistência (Bianche *et al.*, 2017).

Segundo Alvim (2009), os adesivos contribuem para o aumento da rigidez das ligações das peças de madeira em condições controladas. Ainda, os adesivos podem estar associados a outros elementos de ligação como pregos, parafusos e anéis, visando melhorar a transmissão dos esforços que solicitam as ligações.

A classificação dos adesivos pode ser feita conforme a sua composição química, podendo ser orgânico ou inorgânico. Normalmente os adesivos inorgânicos

são à base de silicatos, que são muito empregados nas formulações para confecção de cimentos, chapas metálicas e colagem de substratos porosos (Fiorelli, 2002).

Os principais adesivos encontrados no mercado são à base de polímeros orgânicos, podendo ser de origem natural ou sintética. Tratando-se dos adesivos sintéticos, os adesivos mais utilizados para aplicação estrutural são os polímeros plásticos que endurecem com a ação do calor, destacando-se os fenoplásticos, os aminoplásticos, as resinas de poliuretano e as resinas epóxi. Os três primeiros são muito utilizados na fabricação de peças em MLC, já as resinas epóxi são mais empregadas nas ligações de peças compostas por aderirem a diferentes tipos de materiais (Alvim, 2009).

A ABNT NBR 7190:2022-1, recomenda que os adesivos utilizados em peças estruturais de MLC devem ser estruturais e apresentar propriedades compatíveis às condições ambientais no qual o elemento estrutural será submetido durante a sua vida útil. Ainda, orientam que a quantidade de adesivo e os demais parâmetros de colagem devem atender às especificações dos fabricantes do adesivo. Ocorre, entretanto, que alguns fabricantes não especificam com clareza as condições de uso do adesivo comercializado.

1.2.5 Estabilidade em barras comprimidas

As considerações relacionadas à estabilidade e ao equilíbrio de estruturas são de grande preocupação, pois são de fundamental importância para o projeto (Carvalhar, 2001). Alguns elementos estruturais podem estar sujeitos a esforços de compressão e, se forem esbeltos, a força pode ser grande o suficiente para provocar uma instabilidade. Esses elementos são chamados de colunas, quando submetidos a uma força de compressão axial, e a instabilidade resultante é conhecida, por vezes, como flambagem. A flambagem de uma coluna pode frequentemente ocasionar em uma falha repentina e dramática de uma estrutura ou mecanismo, por isso é essencial dedicar atenção ao projeto de colunas para garantir que estas possam suportar os esforços previstos sem sofrer instabilidade por compressão (Hibbeler, 2009).

Pode-se definir a estabilidade de uma coluna como a tendência natural desta em se manter ou recuperar sua posição original apesar das perturbações que a atinjam, ou seja, sua capacidade de retornar ao estado inicial de equilíbrio após uma alteração induzida (Alvim, 2009).

De acordo com Hibbeler (2009), a força axial máxima que uma coluna pode suportar quando está na iminência de sofrer flambagem é chamada força crítica (P_{cr}). Qualquer força adicional a essa P_{cr} causará a flambagem da coluna, resultando em sua instabilidade, como ilustrado na Figura 11.

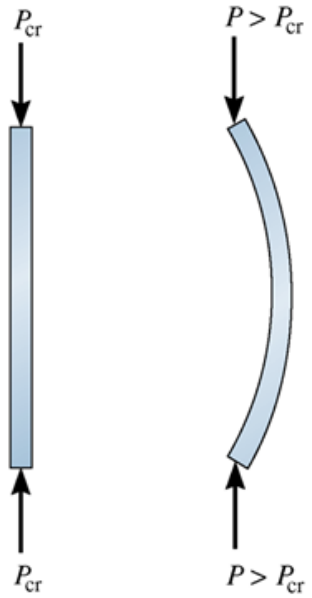


Figura 11 – Flambagem de uma coluna.

Fonte: adaptado de Hibbeler, 2009.

Um dos primeiros estudos sobre a força crítica de flambagem em colunas foi desenvolvido por Euler em 1744. O seu estudo permanece até hoje como um dos fundamentos para a análise da estabilidade de colunas comprimidas (Alvim, 2009).

Para determinar a P_{cr} de flambagem que uma coluna suporta, Euler considerou uma coluna ideal, ou seja, uma barra sem imperfeições geométricas em suas condições iniciais, com a força aplicada no centroide da seção transversal e constituída por um material homogêneo. Ainda, considerou que o material é perfeitamente elástico linear e que a coluna sofre flambagem em apenas um plano (Alvim, 2009; Hibbeler, 2009).

Com o aumento do carregamento, pode-se alcançar um estado limite em que a forma reta de equilíbrio se torna instável. A força correspondente a esse estado limite é a força crítica de flambagem, também denominada como força elástica de flambagem de Euler (Alvim, 2009). No regime elástico, para forças superiores a força crítica, a forma estável de equilíbrio passa a ser a configuração fletida. A força crítica

para a coluna comprimida e esbelta apoiada por pinos pode ser descrita pela Equação 1, também chamada de Equação de Euler.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2} \quad (1)$$

Onde: E é o módulo de elasticidade para o material, I é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo analisado da coluna e L_0 é o comprimento de flambagem na direção de análise.

A força crítica nada mais é que a força máxima que uma coluna pode suportar sem sofrer flambagem, ou seja, a maior força que pode ser aplicada sem comprometer a sua estabilidade (Beer e Johnston, 1995).

Pode-se observar que a força crítica é independente da resistência do material, dependendo somente das propriedades geométricas da coluna (I e L_0) e da rigidez do material (E). Assim, a capacidade resistente de uma coluna aumenta à medida que o momento de inércia da seção transversal aumentar e que seu comprimento diminuir (Hibbeler, 2009). Vale ressaltar que a Equação 1, considera que a coluna é biarticulada, com as extremidades presas por pinos. Se a coluna apresentar outras tipologias de apoios a equação de Euler pode ser usada desde que o comprimento de flambagem (L_0) expresse a distância entre pontos de momento nulo. Na Figura 12 estão ilustrados os comprimentos de flambagem considerados para algumas condições de extremidades.

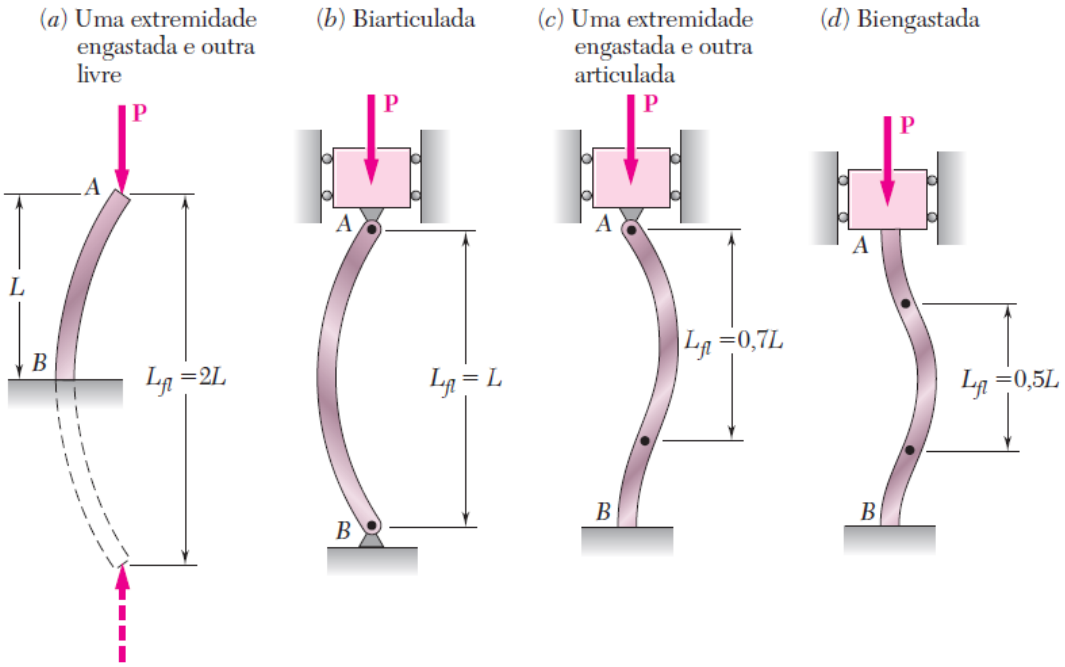


Figura 12 – Comprimento de flambagem de coluna para várias condições de extremidade.

Fonte: Beer *et al.*, 2011.

O valor da tensão que corresponde à força crítica é denominado tensão crítica de flambagem elástica. Considerando que o momento de inércia pode ser calculado por $I = Ar^2$ onde A é a área da seção transversal e r é o raio de giração da seção transversal, pode-se expressar a tensão crítica pela Equação 2.

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EAr^2}{AL_0^2} \therefore \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L_0/r)^2} \therefore \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2)$$

Em que: σ_{cr} é a tensão crítica de flambagem e r é o raio de giração da coluna. A relação geométrica L_0/r é chamada de índice de esbeltez (λ) da coluna (Hibbeler, 2009).

Vale ressaltar que a equação de Euler é válida apenas quando o material está no regime elástico. Como consequência, a tensão atuante é limitada àquela que caracteriza-se como a tensão no limite de proporcionalidade, ocasionando em um índice de esbeltez mínimo a partir do qual a equação de Euler pode ser aplicada. Considerando as características da madeira de *Pinus* sp. utilizada por Possa (2021), é possível apresentar um gráfico da tensão crítica de flambagem em relação ao índice

de esbeltez (λ) conforme ilustra a Figura 13. A ABNT NBR 7190:2022-3, ao orientar o cálculo do módulo de elasticidade, considera que a madeira permanece no regime elástico até atingir 50% da resistência última à compressão, garantindo a utilização apenas do trecho linear do diagrama tensão × deformação específica. Assim, no gráfico da Figura 13 destacou-se a tensão crítica ($\sigma_{lp,mad}$) igual a 22,5 MPa, o que corresponde, para esta madeira, seu limite de proporcionalidade, uma vez que sua resistência última é da ordem de 45 MPa.

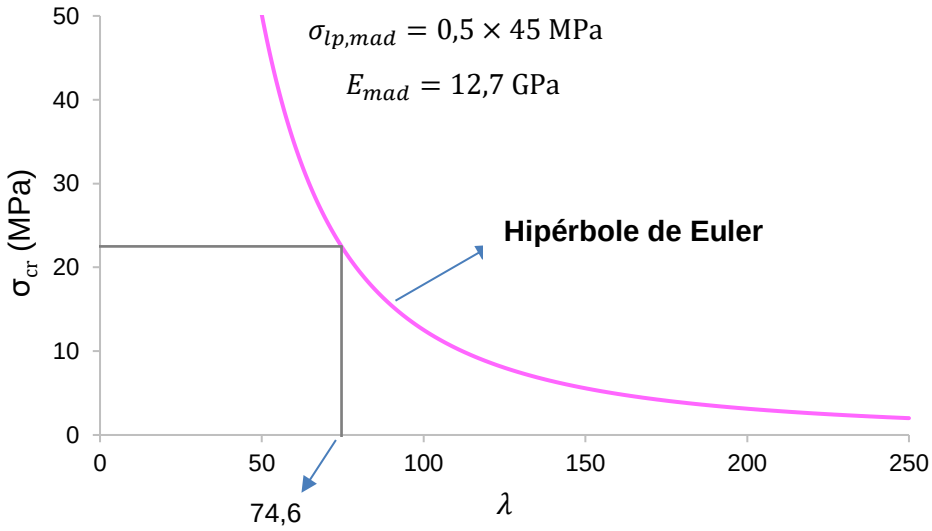


Figura 13 – Tensão crítica de flambagem × índice de esbeltez.

Fonte: adaptado de Possa, 2021.

Aplicando o módulo de elasticidade (12,7 GPa) e a tensão crítica, igual à tensão no limite de proporcionalidade, na Equação 2 é possível obter o índice de esbeltez mínimo (λ_{lim}) de 74,6 indicado na Figura 13. Desta forma, a equação para obter a força crítica de flambagem pode ser utilizada a partir de índices de esbeltez iguais ou superiores a 74,6. Quando a coluna apresenta um índice de esbeltez menor que λ_{lim}, a tensão na peça ultrapassará a tensão no limite de proporcionalidade ($\sigma_{lp,mad}$) e a flambagem do material ocorrerá fora do regime elástico. Nesses casos, a equação de Euler não é válida, e ocorre a flambagem dita inelástica, conforme é explicado na sequência.

1.2.5.1 Flambagem inelástica

No geral, as colunas são classificadas conforme o tipo de tensão que atua no seu interior no momento da falha. Na abordagem adotada pela ABNT NBR 7190:1997 até o ano de 2022, a coluna era classificada conforme o seu índice de esbeltez em curta, medianamente esbelta e esbelta. Para índices de esbeltez menores ou iguais a 40, a peça era considerada curta; para índices de esbeltez maiores que 40 e menores ou iguais a 80, era classificada como medianamente esbelta; e para índices superiores a 80, a peça era considerada esbelta.

Colunas esbeltas se tornam instáveis quando a tensão de compressão permanecer elástica, sendo esta falha denominada de instabilidade elástica. Já colunas medianamente esbeltas falham devido à instabilidade inelástica, ou seja, a tensão de compressão na falha é maior do que o limite de proporcionalidade do material. Para as colunas curtas não há essa instabilidade, sendo que a madeira simplesmente sofre falha por esmagamento (Hibbeler, 2009).

A aplicação da equação de Euler considera que a tensão na coluna sempre estará abaixo do limite de proporcionalidade do material (σ_{lp}) quando a coluna sofrer flambagem. Desta forma, esta equação só se aplicaria às colunas esbeltas, ou seja, para índices de esbeltez superiores à λ_{lp}. Na prática, o comportamento das colunas medianamente esbeltas pode ser estudado modificando-se a Equação 1 de maneira que ela se aplique também à flambagem inelástica.

Se o índice de esbeltez da coluna for menor do que λ_{lp}, a tensão crítica na coluna será maior do que σ_{lp}. Conforme ilustra a Figura 14-B, admita-se que uma coluna tenha um índice de esbeltez $\lambda_1 < \lambda_{lp}$, com tensão crítica de $\sigma_1 > \sigma_{lp}$, quando a coluna sofrer flambagem. A situação equivalente na Figura 14-A implica, conforme ilustrado, na existência de um módulo de elasticidade tangente (E_t) o qual será menor que o módulo de elasticidade do regime elástico. Esta situação possível na Figura 14-A está representada pelo ponto C. Desta forma, a coluna no momento de falha comporta-se como se fosse feita de um material com menor rigidez do que quando se comporta elasticamente (Hibbeler, 2009).

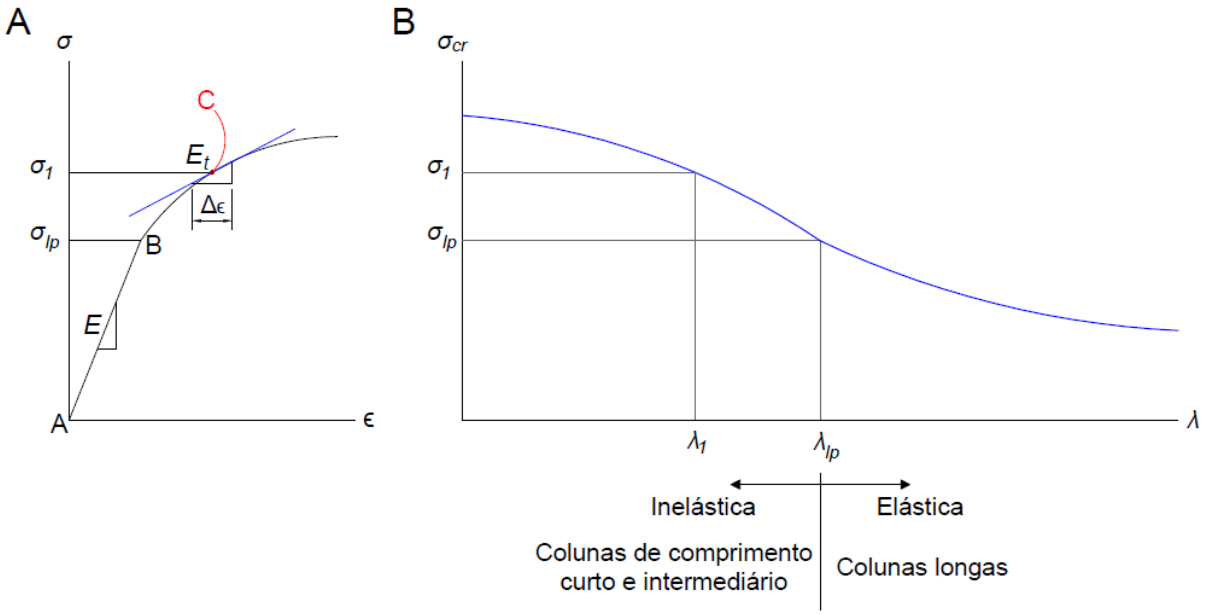


Figura 14 – Diagrama tensão-deformação para um material (A) e representação gráfica da Equação 3 para colunas medianamente esbeltas (B).

Fonte: adaptado de Hibbeler, 2009.

Sendo assim, à medida que o índice de esbeltez diminui a tensão crítica na coluna aumentará e o módulo tangente E_t do material será menor. Desta forma é possível modificar a equação de Euler, conforme é apresentado na Equação 3.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 . E_t}{\lambda^2} \tag{3}$$

1.2.5.2 Colunas com carregamento excêntrico

A equação de Euler é deduzida assumindo que a força P sempre é aplicada no centroide da área da seção transversal da coluna e que a coluna é perfeitamente reta. Mas a realidade é que a força P aplicada a uma coluna nunca é perfeitamente centrada e não se conhece a posição da aplicação da força com precisão. Assim, existe uma distância entre a linha de ação da força P e o eixo da coluna, conforme é ilustrado na Figura 15. Esta distância, denominada de excentricidade (e), irá gerar um momento fletor ($M = P.e$).

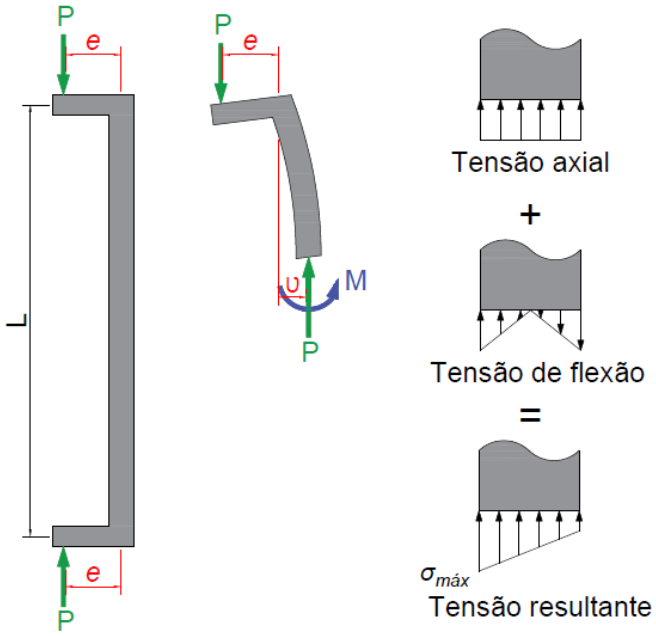


Figura 15 - Coluna com aplicação de força excêntrica.

Fonte: adaptado de Hibbeler, 2009.

Observa-se que, por menor que sejam a força (P) e a excentricidade (e), irá existir um momento (M) que provocará alguma flexão na coluna. Desse modo, a flambagem deixa de ser uma questão de se determinar até que ponto a coluna se mantém reta e estável sob a ação de uma força crescente (P), passando a ser uma questão de definir até que ponto pode-se majorar a flexão, devido ao aumento da força, sem exceder a tensão admissível do material (Beer e Johnston, 1995; Hibbeler, 2009).

Conforme a Figura 15, nota-se que a tensão máxima na coluna é resultante de uma tensão axial, oriunda da força normal, somada a uma tensão de flexão, oriunda de um momento máximo ($M = P \times e$) que ocorre no ponto médio da coluna, conforme apresentado na Equação 4. Trata-se, portanto, de um problema de tensões, ou seja, devem ser verificadas as tensões provenientes da ação da força normal combinada ao momento fletor (Alvim, 2009).

$$\sigma_{máx} = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} \therefore \sigma_{máx} = \frac{P}{A} + \frac{Pec}{I}\sec\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}\frac{L}{2}\right) \quad (4)$$

Como o raio de giração é definido por $r^2 = I/A$, a Equação 4 pode ser reescrita conforme a Equação 5 para determinar essa tensão máxima, sendo esta denominada de fórmula da secante (Hibbeler, 2009).

$$\sigma_{máx} = \frac{P}{A}\left[1 + \frac{ec}{r^2}\sec\left(\frac{\lambda}{2}\sqrt{\frac{P}{EA}}\right)\right] \tag{5}$$

Onde $\sigma_{máx}$ é a tensão elástica máxima na coluna, P é a força vertical aplicada à coluna, e é a excentricidade da força P e c é a distância do eixo neutro até a fibra externa da coluna onde ocorre a tensão máxima. Esta equação indica uma relação não linear entre a força e a tensão e, por consequência, as forças têm de ser somadas antes de determinar a tensão (Hibbeler, 2009).

Beer *et al.* (2011, aplicaram a Equação 5, para gerar o gráfico do índice de esbeltez (λ) em relação a P/A para vários valores de índice de excentricidade (ec/r^2), conforme ilustra a Figura 16. Os autores consideraram uma coluna em aço com tensão de escoamento (σ_E) igual a 250 MPa e módulo de elasticidade (E) de 200 GPa.

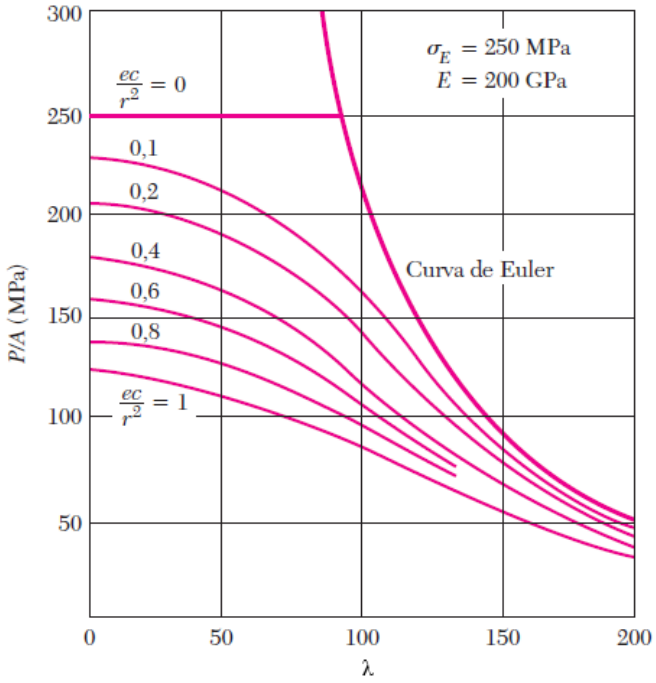


Figura 16 – Aplicação da fórmula da secante para diversos índices de excentricidade (ec/r^2).

Fonte: Beer *et al.*, 2011.

Percebe-se que a excentricidade tem um maior efeito na capacidade de força para colunas com índices de esbeltez pequenos. Já para índices de esbeltez maiores, as colunas tendem a falhar próximo à força crítica de flambagem, independentemente do valor da excentricidade (Beer e Johnston, 1995). A fórmula da secante é útil principalmente para colunas medianamente esbeltas. Segundo Beer *et al.* (2011), para utilizar esta equação de forma eficiente é necessário saber o valor da excentricidade da força, porém raramente este valor é conhecido.

Nenhuma coluna real pode ser considerada como perfeitamente reta e carregada ao longo de seu centroide. Nesse contexto, diversas teorias já foram propostas para avaliar a tensão crítica de flambagem inelástica, mas nenhuma delas é universal (Hibbeler, 2009). Desta forma, cada norma técnica adota a teoria que considera mais adequada. Na sequência é apresentada a forma que a ABNT NBR 7190:2022-1 utiliza para o dimensionamento de peças comprimidas em madeira, além de uma breve introdução sobre a evolução desta normativa.

1.2.5.3 Dimensionamento de peças comprimidas segundo a ABNT NBR 7190: evolução normativa e critérios da versão de 2022

A primeira norma brasileira que estabeleceu critérios para o dimensionamento e execução de estruturas de madeira foi a NB-11, em 1951. Essa norma adotava como modelo de segurança o método das tensões admissíveis. A partir de 1982, a NB-11 passou a ser denominada ABNT NBR 7190, porém não houve alterações do seu conteúdo técnico (ABNT, 2022).

Em 1992, iniciaram-se estudos para a revisão dos conceitos relativos ao projeto de estruturas de madeira, resultando na aprovação e publicação da ABNT NBR 7190:1997, que trouxe mudanças significativas em comparação a versão anterior. Essa nova versão passou a adotar uma abordagem probabilística de estados limites, alinhando-se aos métodos já utilizados para outros materiais estruturais, como o aço e o concreto.

O método probabilístico de estados limites estabelece que as solicitações atuantes (S_d) devem ser menores ou iguais às solicitações resistentes de cálculo (R_d), conforme a Equação 6.

$$S_d \leq R_d \quad (6)$$

Em que: S_d é a solicitação de cálculo; e R_d é a resistência de cálculo. O dimensionamento de colunas, conforme a ABNT NBR 7190:1997, dependia do seu índice de esbeltez. Para colunas curtas ($\lambda \leq 40$), supostamente centradas, admitia-se que a peça romperia à compressão simples, sem se tornarem instáveis. Para as colunas medianamente esbeltas ($40 < \lambda \leq 80$) utilizava-se obrigatoriamente uma excentricidade de cálculo (e_d) e, portanto, a verificação considerava as parcelas de tensões provenientes da normal e do momento. Este momento era proveniente da multiplicação da força de cálculo pela excentricidade de cálculo (e_d) a qual tinha origem nas excentricidades inicial (e_i) e acidental (e_a). Já para colunas esbeltas ($\lambda > 80$), o dimensionamento era semelhante ao de colunas medianamente esbeltas, porém com a adição de uma excentricidade suplementar de primeira ordem (e_c), que representava a fluência da madeira. Na Figura 17, considerando a caracterização do lote de madeira de *Pinus* sp. utilizado por Possa (2021), é possível observar a relação entre a resistência de cálculo à compressão e o índice de esbeltez conforme considerava a ABNT NBR 7190:1997.

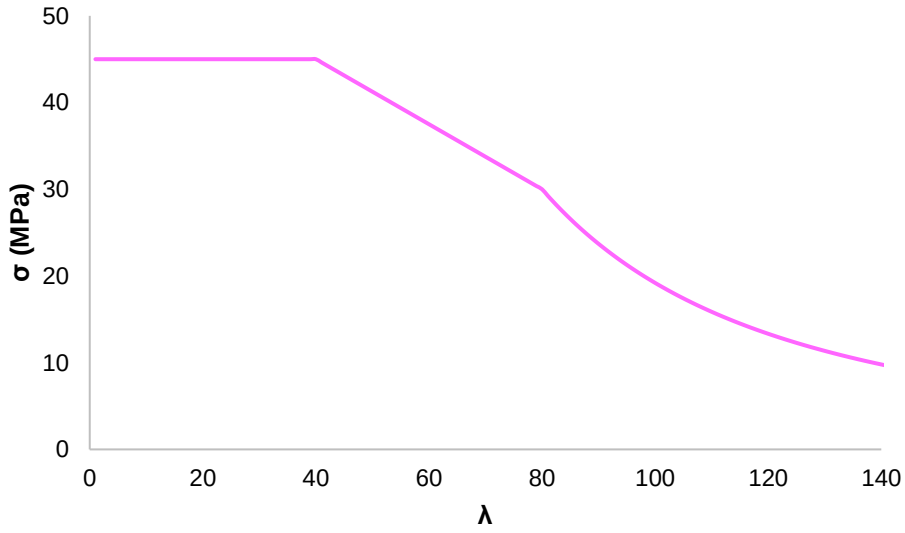


Figura 17 – Tensão × índice de esbeltez para madeira de *Pinus* sp. conforme a ABNT NBR 7190:1997.

Fonte: adaptado de Possa, 2021.

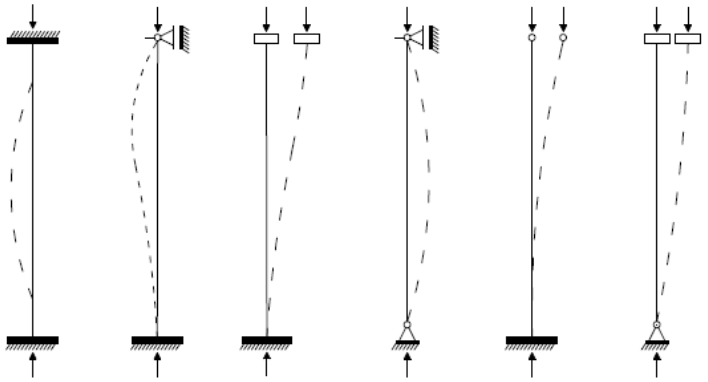
É possível observar que para colunas curtas a resistência ao esforço normal da estrutura equivalia à resistência à compressão da madeira. Para peças medianamente esbeltas a resistência decrescia linearmente com o aumento do índice de esbeltez. E, por último, para peças esbeltas, nota-se que a resistência de projeto ao esforço normal assemelha-se à hipérbole de Euler.

Em 2022, a norma foi revisada e passou a ser dividida em seis partes, com mudanças significativas, como a inclusão de novos coeficientes de modificação da resistência e critérios atualizados para análise de peças comprimidas e flexocomprimidas. A seguir, abordam-se os critérios adotados pela ABNT NBR 7190:2022 para a verificação de peças comprimidas, nesta versão. Segundo a ABNT NBR 7190:2022-1, o dimensionamento das peças depende da sua esbeltez (λ), que pode ser calculada conforme a Equação 7.

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{I/A}} \tag{7}$$

O comprimento de flambagem é associado às condições de vinculação das extremidades das barras, sendo multiplicado o comprimento da coluna por um coeficiente K_E ($L_0 = K_E . L$). Os valores de K_E são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos coeficientes K_E.

Modos de flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				

Fonte: ABNT, 2022.

A ABNT NBR 7190:2022-1 preconiza que o índice de esbeltez de peças sujeitas à compressão axial ou à flexocompressão não deve ser maior que 140. Além do cálculo do índice de esbeltez, esta norma também estabelece o cálculo do índice de esbeltez relativo em relação ao eixo da seção transversal analisada. Na Equação 8 é apresentado o índice de esbeltez relativo correspondente à flexão em *x* ($\lambda_{rel,x}$) e na Equação 9 à flexão em *y* ($\lambda_{rel,y}$).

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \tag{8}$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \tag{9}$$

Em que: λ_x e λ_y são os índices de esbeltez segundo os eixos x e y, respectivamente, $E_{0,05}$ é o módulo de elasticidade característico medido na direção paralela às fibras da madeira e $f_{c0,k}$ é a resistência característica à compressão paralela às fibras.

Para índice de esbeltez relativo menor que 0,3, as peças devem satisfazer às condições de compressão ou de flexocompressão. Já para índice de esbeltez relativo superior a 0,3, em qualquer direção, as condições de estabilidade também devem ser atendidas, conforme as Equações 10 e 11.

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx}.f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \tag{10}$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy}.f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \tag{11}$$

Em que: $\sigma_{Nc,d}$ é o valor de cálculo da tensão de compressão normal à seção transversal, $f_{c0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras, σ_M é a tensão normal de flexão proveniente do momento fletor de primeira ordem devido às forças laterais, excentricidades na aplicação das forças axiais, curvatura inicial da barra, deformações induzidas ou quaisquer outras situações em que há momentos fletores de primeira ordem atuando na barra na direção x ou y; $f_{m,d}$ é a resistência de cálculo na flexão; k_M é o coeficiente de correção, que para seção retangular é igual a 0,7. Os coeficientes k_{cx} e k_{cy} são calculados conforme as Equações 12 e 13.

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - \left(\lambda_{rel,x}\right)^2}} \tag{12}$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{\left(k_y\right)^2 - \left(\lambda_{rel,y}\right)^2}} \tag{13}$$

Em que: $k_x = 0{,}5.\left[1 + \beta_c\left(\lambda_{rel,x} - 0{,}3\right) + \lambda_{rel,x}^2\right]$ e $k_y = 0{,}5.\left[1 + \beta_c\left(\lambda_{rel,y} - 0{,}3\right) + \lambda_{rel,y}^2\right]$. β_c é o fator para peças estruturais que atendam aos limites de divergência de alinhamento, sendo que para MLC considera-se $\beta_c = 0{,}1$.

Para se obter as tensões de compressão normal à seção transversal ($\sigma_{Nc,d}$) e de flexão proveniente do momento fletor de primeira ordem devida às forças laterais (σ_M) utiliza-se as Equações 14 e 15, respectivamente.

$$\sigma N_{c,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \tag{14}$$

$$\sigma_{M,d} = \frac{M_d / W}{f_{m,d}} \tag{15}$$

Em que: $N_{c,d}$ é o valor de cálculo da força normal de compressão, M_d é o valor de cálculo do momento fletor e W é o módulo de resistência da seção transversal à direção paralela às fibras, em relação ao eixo central da inércia perpendicular ao plano de ação do momento fletor.

Considerando o lote de madeira utilizado por Possa (2021), com resistência à compressão de 45 MPa e módulo de elasticidade de 12,7 GPa é possível gerar o gráfico tensão × índice de esbeltez relativo, conforme ilustra a Figura 18. Nota-se que para λ_{rel} até 0,3 a tensão crítica é igual a resistência à compressão, ou seja, a falha ocorre por conta do esmagamento das fibras da madeira. Após, segue-se para o trecho onde as colunas apresentam comprimentos intermediários e sua falha depende tanto da resistência à compressão quanto do módulo de elasticidade do material. Posteriormente, ocorre a flambagem elástica do material, conforme a equação de Euler, próximo a $\lambda_{rel} = 1{,}5$.

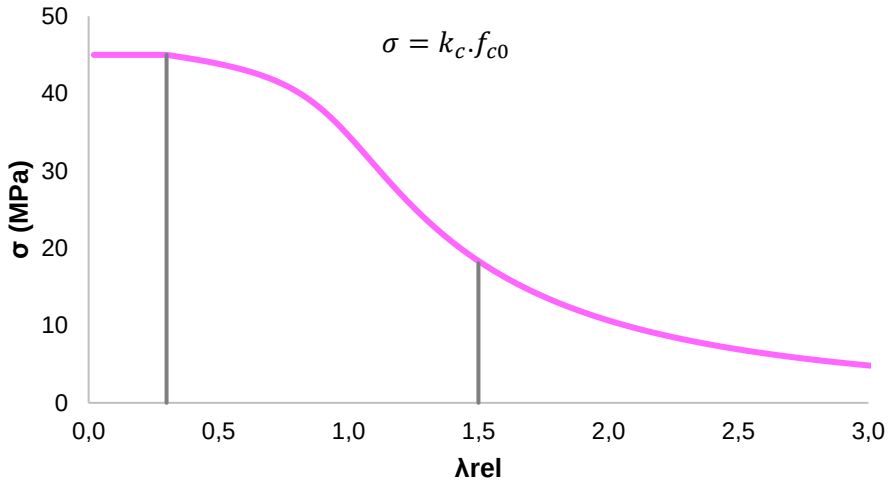


Figura 18 – Tensão × índice de esbeltez relativo para uma madeira de *Pinus* sp. conforme a ABNT NBR 7190:2022.

Fonte: Autora, 2025.

Neste trabalho foram confeccionadas colunas em MLC com índice de esbeltez igual a 140, apresentando um índice de esbeltez relativo próximo a 2,8. Como a equação de Euler pode ser aplicada a partir de índices de esbeltez da ordem de 75, esperava-se que ocorresse a instabilidade das colunas.

2. CAPÍTULO II. DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS COM ADESIVO 1C-PUR EM DIFERENTES ÂNGULOS

POSSA, Desirè Coraça; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2025. **Desempenho mecânico de juntas coladas com adesivo 1C-PUR em diferentes ângulos.** Professor orientador Dr. Alfredo Petrauski. Professor coorientador Dr. Mateus Couri Petrauski.

RESUMO

As árvores de reflorestamento são uma alternativa para suprir as necessidades industriais, e uma das possíveis aplicações é o seu emprego em estruturas pré-fabricadas, como é o caso da madeira lamelada colada (MLC). Este trabalho teve como principal objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento na compressão e na torção de juntas de *Pinus* sp. coladas com adesivo poliuretano monocomponente (1C-PUR), tendo-se realizado a colagem com diferentes ângulos em relação as fibras da madeira. Também foi avaliado o emprego da fórmula de Hankinson, como estimadora da resistência ao cisalhamento de juntas coladas e o percentual de falha na madeira. Foram confeccionados 144 corpos de prova, sendo metade destinada ao ensaio de resistência ao cisalhamento sob compressão e a outra metade para o ensaio de resistência ao cisalhamento sob torção. As lâminas de madeira foram separadas em oito grupos conforme a sua densidade aparente. Constatou-se que a resistência ao cisalhamento foi afetada pelo ângulo de colagem no ensaio de compressão. O desempenho mecânico no ensaio sob compressão mostrou-se diferente do desempenho obtido no ensaio sob torção para seis dos nove ângulos estudados. A fórmula de Hankinson, pode ser empregada como estimadora da resistência ao cisalhamento na compressão de juntas coladas à diferentes ângulos. Contudo, para estimar a resistência ao cisalhamento na torção não é recomendado o uso desta fórmula. As juntas coladas apresentaram valores satisfatórios em relação a resistência ao cisalhamento e baixos valores de percentual de falha na madeira. De modo geral, os resultados desta pesquisa foram compatíveis com os encontrados em pesquisas similares onde utilizou-se outros adesivos.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira lamelada colada; Resistência; Adesão.

POSSA, Desirè Coraça; Western Paraná State University. February 2025. **Mechanical performance of adhesive bonded joints with 1C-PUR adhesive at different angles.** Advising Professor Dr. Alfredo Petrauski. Co-advising Professor Dr. Mateus Couri Petrauski.

ABSTRACT

Reforestation trees are an alternative to meet industrial needs, and one of the potential applications is their use in prefabricated structures, such as glued laminated timber (glulam). This study aimed to evaluate the shear strength of *Pinus* sp. bonded joints made using a single-component polyurethane adhesive (1C-PUR). The joints were fabricated varying the angles between the wood fibers ranging from 0º to 90º and tested under compression and torsional loads. The use of the Hankinson's equation as an estimator of shear strength of glued joints and the percentage of wood failure were also evaluated. A total of 144 specimens were tested. Half of the total was subjected to shear test under compression load while the other half was subjected to shear test under torsional load. The wood laminates used to make the joints were previously divided into eight groups according to their apparent density. The results showed that the shear strength was affected by the bonding angle, especially for those tested under compression loads. The mechanical behavior of the shear test under compression was considered different from that of the test under torsion for six of the nine angles used in the study. It was also found that Hankinson's equation can be used as an estimate of the shear strength of joints bonded with different angles when the tests are performed under compression loads. However, the equation was not appropriate for estimating the test results when shear was caused by torsional loads. Overall, the bonded joints presented satisfactory shear strength and low percentage of wood failure. Furthermore, the results of this research were in accordance to those found on similar research where other adhesives were used.

KEYWORDS: Glulam; Strength; Adhesion.

2.1 INTRODUÇÃO

O uso da madeira nas mais diversas aplicações vem se destacando no cenário mundial, especialmente na substituição de produtos oriundos de fontes não renováveis (Longue Jr e Colodette, 2013). Desta forma, as florestas plantadas surgem como uma alternativa para suprir as necessidades industriais utilizando, normalmente, espécies de madeiras exóticas (Bolgenhagen *et al.*, 2015).

Apesar do Brasil possuir uma área florestal nativa que representa 58,5% do seu território, somente 2% desse território, equivale a área de florestas plantadas (SFB, 2019). Nesse contexto, o reflorestamento foi empregado no Brasil, com ênfase para os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, visando a preservação das matas nativas. As espécies reflorestadas são amplamente utilizadas na indústria de base florestal-madeireira (Araujo *et al.,* 2017).

Uma das possíveis aplicações da madeira proveniente de reflorestamento é a sua utilização em estruturas. Além de ser um material renovável, a madeira exibe excelentes propriedades estruturais, principalmente por possuir resistência tanto à tração como à compressão, sendo considerada um dos melhores materiais para essa utilização (Pigozzo *et al.*, 2018a; Pigozzo *et al.*, 2018b).

Comparando-se com outros materiais estruturais, a madeira exibe resistência à compressão semelhante ao concreto simples e ambos possuem resistência inferior ao aço. No entanto, a madeira apresenta densidade inferior quando comparada a esses outros materiais, exibindo uma excelente relação resistência/densidade (Ramage *et al.*, 2017). Ainda, a madeira exibe outras vantagens como beleza, baixo consumo energético para o seu processamento, bom isolamento térmico e fácil trabalhabilidade (Vidal *et al.*, 2015). Essas características ressaltam a madeira como um material estrutural eficiente.

Um dos produtos estruturais fabricados a partir da madeira é a madeira lamelada colada (MLC), que há vários anos vem sendo estudada no Brasil e, normalmente, utilizando espécies de reflorestamento (Molina *et al.*, 2016). A MLC, que possui uma longa história em países desenvolvidos, é um produto tradicional da engenharia que consiste em uma série de lâminas de madeira serrada coladas por meio de adesivos estruturais, sendo de grande importância a adesão do substrato com o adesivo (Nadir *et al.*, 2016; Pang *et al.*, 2018). Além do seu processo de fabricação industrializado, os produtos feitos em MLC, podem ser empregados nos

mais diversos projetos arquitetônicos e com diferentes dimensões (Segundinho *et al.*, 2021).

Para a fabricação de estruturas em MLC é importante que seja avaliada, primeiramente a capacidade de adesão das madeiras utilizadas. O mecanismo de adesão é influenciado pelas características anatômicas, químicas, físicas e mecânicas da madeira e, também, pelas propriedades físicas e químicas do adesivo (Albino *et al.*, 2012; Gonçalves *et al.*, 2016). A qualidade da colagem de madeiras pode ser avaliada por meio de ensaios normatizados, avaliando-se, por exemplo, a resistência ao cisalhamento das juntas coladas e o percentual de falha no plano de colagem (Bila *et al.*, 2016).

Embora a ABNT NBR 7190:2022-1, não admita a colagem de lamelas em ângulos diferentes de 0º em relação às fibras da madeira, diversos estudos foram desenvolvidos nos últimos anos que evidenciaram o bom desempenho estrutural de ligações coladas com as fibras inclinadas entre si (Couri Petrauski *et al.*, 2016; Stringari *et al.*, 2020; Possa *et al.*, 2022; Filippini *et al.*, 2023). Nessas pesquisas alguns autores destacam o fato de que as tensões de cisalhamento nos planos colados são originadas por diferentes esforços: forças e/ou momentos.

Alguns trabalhos recentes procuraram avaliar a resistência de juntas coladas à diferentes ângulos, utilizando espécies exóticas. Petrauski *et al.* (2020), propondo metodologia para ensaio de juntas coladas sob torção, com lamelas de *Eucalyptus* sp. e adesivos resorcinol formaldeído e poliuretano à base de óleo de mamona, encontraram resultados que apontaram perda da resistência com o aumento de ângulos de colagem e diferença significativa de desempenho de juntas conforme o esforço atuante, gerador da ruptura. Padilha *et al.* (2023), constataram a mesma tendência trabalhando com *Pinus* sp. e adesivo à base de óleos vegetais. Estes pesquisadores recomendaram a realização de pesquisas semelhantes, destacando a necessidade de testar outros adesivos e espécies florestais.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento na compressão e na torção de juntas de *Pinus* sp. coladas com adesivo poliuretano monocomponente (1C-PUR), realizando a colagem com nove ângulos distintos em relação às fibras da madeira. Adicionalmente, também foi avaliado o emprego da fórmula de Hankinson como estimadora da resistência ao cisalhamento de juntas coladas e o percentual de falha na madeira. A metodologia adotada no

quesito resistência foi a mesma utilizada por Padilha *et al.* (2023), pesquisadores que trabalharam com adesivo bicomponente à base de óleos vegetais.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia – LEME e no Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira – LATEM ambos pertencentes à Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, no *campus* de Cascavel-PR.

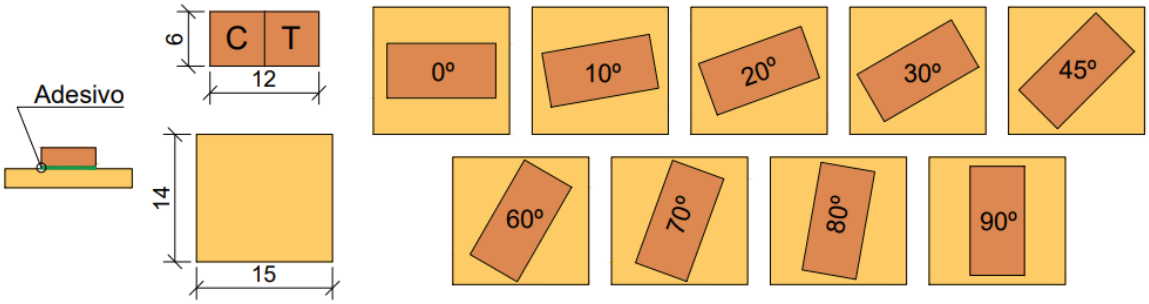
Os materiais utilizados foram a madeira de *Pinus* sp. e o adesivo monocomponente à base de poliuretano (1C-PUR), produzido e comercializado pela empresa Rendicolla®. A madeira, comprada no comércio local, ficou estocada até atingir o equilíbrio higroscópico, com teores de umidade próximos a 12%. A densidade aparente da madeira variou entre 0,46 a 0,67 $g.cm^{-3}$, para teor de umidade médio de 12,4%.

Em todo processo de colagem aplicou-se o adesivo em uma das faces, sendo espalhado com a utilização de uma trincha. Utilizou-se a gramatura de 250 $g.m^{-2}$ e pressão de colagem de 0,7 MPa, com base no estudo realizado por Tomé *et al.* (2023).

2.2.1 Confecção das juntas

Separou-se as lamelas para a pesquisa em oito grupos (G1 a G8), com base na densidade aparente, conforme a metodologia utilizada por Padilha *et al.* (2023). Assim, para cada grupo de densidade foram confeccionadas juntas com ângulos de 0º, 10º, 20º, 30º, 45º, 60º, 70º, 80º e 90º, em relação às fibras da madeira. De cada junta, retirou-se posteriormente dois corpos de prova para ensaios à compressão e à torção, respectivamente.

A colagem foi realizada utilizando-se lamelas com dimensões de 2,1 x 6 x 12 cm^3, posicionadas sobre lamelas com dimensões de 2,1 x 14 x 15 cm^3, permitindo rotacionar a peça conforme o ângulo necessário (Figura 19). Para posicionar as fibras da madeira no ângulo desejado foram confeccionados gabaritos para cada ângulo. Na Figura 20 é possível visualizar o esquema que foi adotado utilizando o ângulo de 20º como exemplo.



C - CP destinado a ruptura por cisalhamento a compressão.
T - CP destinado a ruptura por cisalhamento a torção.

Figura 19 – Modelo de colagem e extração dos corpos de prova, dimensões em cm.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 20 – Sequência de posicionamento do gabarito utilizado para a confecção das juntas com as fibras coladas em diferentes ângulos.

Fonte: Autora, 2025.

As lamelas tiveram seu último processamento realizado no dia da colagem, utilizando a plaina desengrossadeira e a plaina desempenadeira, e foram limpas com o auxílio de ar comprimido e trincha. Foram colados dois grupos de densidade por dia, sendo posicionadas duas juntas em cada pilha na mesa de prensagem.

No procedimento da colagem, o tempo em aberto foi nulo e o tempo em fechado foi de aproximadamente 10 minutos. A prensagem foi realizada manualmente, com o emprego de um torquímetro digital da marca Wisretec, aplicando-se pressão de 0,7 MPa. Passados 20 minutos foi dado reaperto e as juntas ficaram sob pressão por um período mínimo de 12 horas.

Ao final da colagem, obteve-se temperatura média de 23,8 °C, e uma umidade relativa do ar média de 43,75% no ambiente. As peças de madeira, por sua vez, foram coladas com umidade variando entre 11,4% e 13,6%, com média geral de 12,4% e coeficiente de variação de 3,68%. Esperou-se um período mínimo de sete dias para finalização dos corpos de prova e consequente ruptura.

2.2.2 Resistência ao cisalhamento

O ensaio de resistência ao cisalhamento na compressão foi executado conforme a ASTM D 905 (2013), e para a determinação da resistência na torção realizou-se o ensaio conforme a metodologia sugerida por Petrauski *et al.* (2020). Cada corpo de prova foi instalado no aparato específico e ensaiado em prensa servocontrolada, modelo UH501-NS 14009 da Intermetric, já os corpos de prova de cisalhamento na torção foram ensaiados na Máquina Universal de Ensaios. Nas Figuras 21 e 22 são ilustrados os ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento na compressão e na torção, respectivamente.

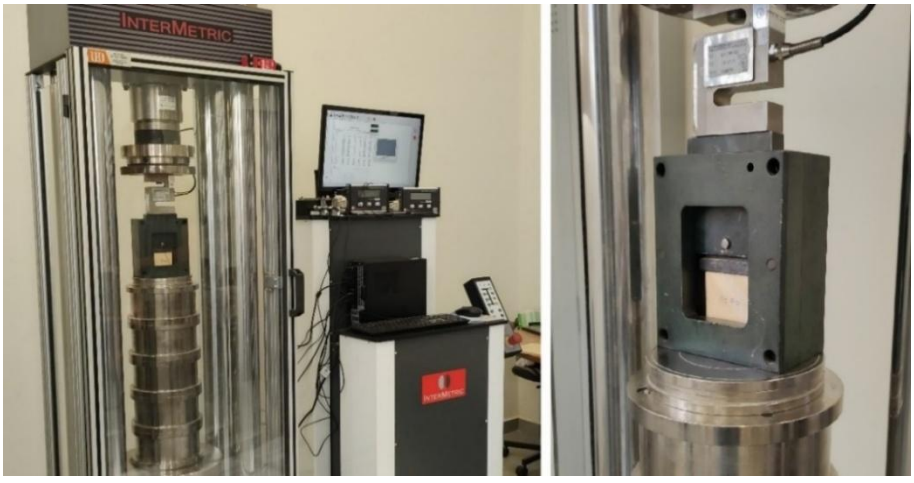


Figura 21 - Ensaio de cisalhamento na compressão com o aparato tipo guilhotina na prensa eletromecânica.

Fonte: Autora, 2025.

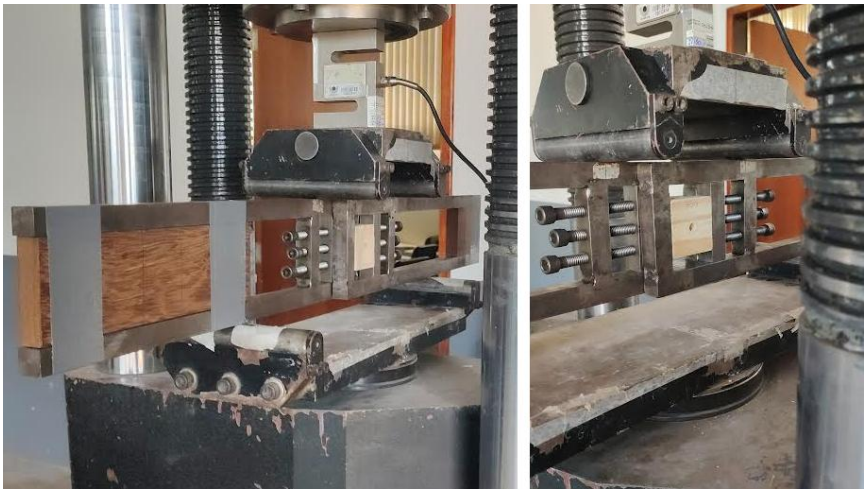


Figura 22 – Ensaio de cisalhamento na torção com o aparato na Máquina Universal de Ensaios.

Fonte: Autora, 2025.

Após a ruptura, uma parte do corpo de prova foi destinada para obter a umidade e a outra parte foi utilizada para se obter o percentual de falha da madeira. Adicionalmente, foram executados e rompidos outros 30 corpos de prova com o intuito de obter a resistência ao cisalhamento da madeira sólida, conforme a ABNT NBR 7190:2022-3. Este ensaio complementar objetivou a comparação dos resultados com a resistência ao cisalhamento das juntas coladas a 0°.

2.2.3 Avaliação estatística dos resultados de resistência

Realizou-se o experimento em parcelas subdivididas de modo que os grupos de densidade representassem parcelas. Os valores médios de densidade, por grupo, foram: 0,646 g.cm^{-3} (G1); 0,623 g.cm^{-3} (G2); 0,587 g. cm^{-3} (G3); 0,573 g. cm^{-3} (G4); 0,552 g. cm^{-3} (G5); 0,526 g. cm^{-3} (G6); 0,505 g. cm^{-3} (G7); e 0,477 g. cm^{-3} (G8).

No total, foram confeccionados 144 corpos de prova, sendo metade reservada ao ensaio de resistência ao cisalhamento na compressão (C), e a outra metade para o ensaio de resistência ao cisalhamento na torção (T).

Objetivou-se verificar se a resistência era influenciada pelo ângulo de colagem e o tipo de ensaio. Assim, assumiu-se o modelo estatístico para a resistência ao cisalhamento descrito no trabalho de Padilha *et al.* (2023), apresentado conforme a Equação 16.

$$y_{ijk} = \mu + g_k + \alpha_i + e_{ik} + \tau_j + (\alpha\tau)_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad (16)$$

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, ..., 9; j= 1 (compressão) ou 2 (torção) e k=1, 2,..., 8.

As pressuposições do modelo foram analisadas utilizando-se gráficos, medidas descritivas e testes estatísticos. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro Wilk e a homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Bartlett.

Após a verificação das condições, os efeitos de interesse (α_i, τ_j e $(\alpha\tau)_{ij}$) foram analisados por meio do teste F da análise de variância (ANOVA). Quando foram identificadas diferenças significativas entre os níveis do fator, aplicou-se o teste Tukey de comparação das médias. O nível de significância adotado para todos os testes foi de 5%. Para analisar os níveis do fator ângulo em cada ensaio, foi ajustado o modelo não linear de Hankinson descrito pela Equação 17:

$$\hat{y}_{ij} = \frac{\hat{f}_{w0_j}.\hat{f}_{w90_j}}{\hat{f}_{w0j}.\left(sen(\alpha_i)\right)^{b_j} + \hat{f}_{w90_j}.\left(cos(\alpha_i)\right)^{b_j}} + e_{ij.} \quad (17)$$

Em que: $\hat{y}_{ij}$ é a resistência média no i-ésimo ângulo do j-ésimo ensaio; $\hat{f}_{w0_j}$ é o valor da resistência média assintótica do j-ésimo ensaio quando o ângulo tende a zero graus; $\hat{f}_{w90_j}$ 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, as demais variáveis são como definidas na equação anterior.

Aplicou-se o processo de estimação dos mínimos quadrados e avaliou-se a qualidade do ajuste do modelo de Hankinson através de análises gráficas e estatísticas, investigando a soma de quadrados residuais e o coeficiente de determinação (R^2) do modelo estudado.

Executou-se as análises deste estudo no software R (R Core Team, 2022), versão 4.2.1, com utilização dos pacotes *ggplot2*, para a criação dos gráficos, e *ExpDes*, para análise do experimento – testes da ANOVA e Tukey.

2.2.4 Percentual de falha na madeira

Analisou-se o percentual de falha na madeira dos corpos de prova ensaiados ao esforço de cisalhamento na compressão empregando o método previsto pela ASTM D 5266 (2005). Ainda, esta norma exige que o percentual médio de falha na madeira não seja inferior a 75%. No caso dos corpos de prova ensaiados ao cisalhamento na torção, utilizou-se a lâmina desenvolvida por De Paula (2020), conforme ilustrado na Figura 23.

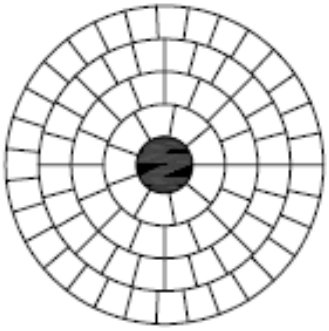


Figura 23 - Lâmina circular para análise do percentual de falha da madeira.

Fonte: De Paula, 2020.

Neste trabalho, foram consideradas como falha na madeira tanto a falha profunda, com visível arrancamento de camadas de fibras, como a falha rasa, quando se percebia a presença de fibras na superfície da ruptura. Na Figura 24, ilustra-se a aplicação das malhas em corpos de prova após a ruptura para a estimação do percentual de falha da madeira.

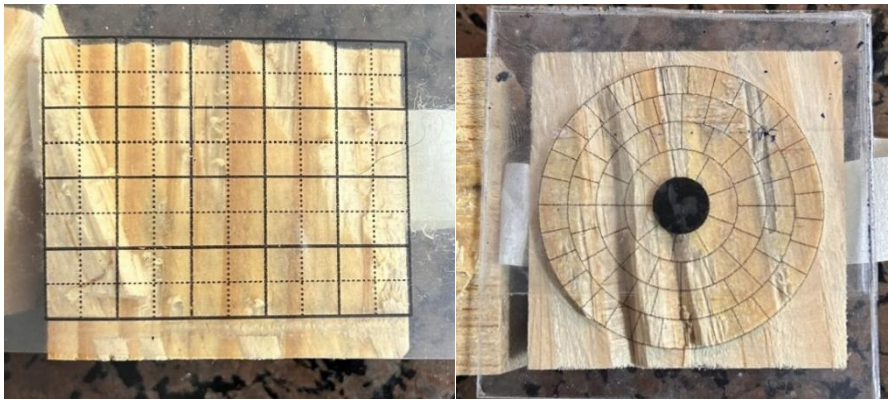


Figura 24 – Lâmina retangular, à esquerda, e lâmina circular, à direita, para análise do percentual de falha da madeira.

Fonte: Autora, 2025.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Resistência das juntas coladas à diferentes ângulos

Submetendo os valores de resistência obtidos à análise de variância, a condição de normalidade e homogeneidade não foi rejeitada. Assim, avaliou-se os fatores de interesse na pesquisa pelo teste F da ANOVA (Tabela 5). Nesse experimento, o coeficiente de variação associado à primeira parte do ensaio foi de 14,94% e na segunda parte foi de 13,54%.

Tabela 5 – Resumo da ANOVA para os resultados experimentais da resistência

Fontes de Variação	G.L.	Somas de quadrados	Teste F	p-valor
Ângulos	8	271,90	29,85	**<0,001**
Grupos/Lotes	7	53,23	6,68	**<0,001**
Erro (parcela)	56	63,76		
Ensaio	1	2,97	3,17	0,079
Ensaio × Ângulo	8	69,80	9,33	**<0,001**
Erro (subparcela)	63	58,93		
Total	143	520,59		

CV1 = 14,94% e CV2=13,54%

Fonte: Autora, 2025.

É possível constatar 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. Ao realizar o desdobramento do fator do ângulo dentro de ensaio, observou-se que há diferença significativa entre os ângulos dado o ensaio ser por cisalhamento na torção ou na compressão (Tabela 6).

Tabela 6 - Resumo da ANOVA dado o desdobramento do fator ângulo dentro de ensaio de resistência

Fontes de Variação	G.L.	Somas de quadrados	Teste F	p-valor
Ângulo/ ensaio: T	8	304,27	36,68	**<0,001**
Ângulo/ ensaio: C	8	37,44	4,51	**<0,001**
Erro combinado	116,13	120,42		

Fonte: Autora, 2025.

Ao realizar-se a análise das resistências por ângulo, observou-se que há diferença considerável entre o ensaio ser por cisalhamento na torção ou na compressão para seis dos nove ângulos estudados (Tabela 7). Verificou-se que os corpos de prova com as fibras da madeira coladas para os ângulos de 45°, 60° e 70°, apresentaram resistências estatisticamente iguais, independente do ensaio.

Tabela 7 - 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	15,02	16,06	**<0,001**
Ensaio/ ângulo: 10°	1	8,20	8,77	**0,004**
Ensaio/ ângulo: 20°	1	18,40	19,67	**<0,001**
Ensaio/ ângulo: 30°	1	6,37	6,81	**0,011**
Ensaio/ ângulo: 45°	1	0,12	0,13	0,722
Ensaio/ ângulo: 60°	1	0,31	0,34	0,564
Ensaio/ ângulo: 70°	1	2,97	3,17	0,079
Ensaio/ ângulo: 80°	1	7,13	7,63	**0,007**
Ensaio/ ângulo: 90°	1	14,24	15,23	**<0,001**
Erro (subparcela)	63	58,92		

Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 8, apresenta as resistências médias ao cisalhamento segundo o ensaio e o ângulo de colagem e os resultados do teste Tukey de comparações múltiplas para o fator ângulo, sendo que as análises foram conduzidas de modo independente por ensaio. Para os dois ensaios houve decréscimo da resistência com o aumento do ângulo de colagem. Além disso, observou-se que os maiores coeficientes de variação foram para os ângulos de 90° e 80°, para os ensaios à compressão e à torção, respectivamente. Os resultados obtidos para cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 8 - Resistência média ao cisalhamento segundo ensaio e ângulo de colagem

Ângulo	**Resistência média ao cisalhamento (MPa)**			
	Compressão		**Torção**	
0°	9,36 (12,93)	a	7,42 (13,88)	x
10°	9,27 (9,06)	a	7,83 (14,18)	x
20°	9,56 (15,17)	ab	7,42 (17,79)	xy
30°	9,17 (16,79)	ab	7,91 (11,13)	xy
45°	7,66 (21,27)	bc	7,48 (18,85)	xy
60°	6,36 (20,28)	cd	6,64 (10,24)	xy
70°	5,27 (25,05)	de	6,13 (12,07)	y
80°	4,75 (22,74)	e	6,08 (21,71)	y
90°	4,18 (28,47)	e	6,07 (7,08)	y

Nota: médias seguidas pelas mesmas letras não se diferenciam estatisticamente, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Em parênteses estão os coeficientes de variação (C.V.%).

Fonte: Autora, 2025.

Para Pimentel-Gomes (2022), o CV, embora, não considere o número de repetições é uma estatística associada à precisão do experimento, sendo desejável um valor baixo. A ABNT NBR 7190:2022-1, admite coeficientes de variação de 28% para resultados estatísticos envolvendo tensões de cisalhamento. Nesta pesquisa, no ensaio à compressão, os coeficientes de variação ficaram entre 9,06% e 28,47%, respectivamente para os ângulos de 10° e 90°, com média para os nove ângulos de 19,13%. Exceto para o ângulo de 90°, com resultado pouco acima de 28%, para todos os outros ângulos os coeficientes calculados ficaram abaixo de 28%. Para o ensaio à torção, os valores variaram entre 7,08% e 21,71%, respectivamente, para os ângulos de 90° e 80°, com média de 14,10%. De modo geral, portanto, a variabilidade

experimental obtida pode ser considerada dentro do esperado. Comparativamente Padilha *et al.* (2023), e Petrauski *et al.* (2020), encontraram coeficientes de variação médios inferiores a 28% para ambos os ensaios.

No ensaio de cisalhamento à compressão houve correlação entre o ângulo de colagem e os CVs encontrados, indicando possível perda de precisão com o aumento do ângulo. Neste trabalho obteve-se um coeficiente de correlação de 0,94. Embora este resultado, a evidência não se confirma em trabalhos similares. Os resultados apresentados por Padilha *et al.* (2023), tendo usado adesivo poliuretano bicomponente, indicam coeficiente de correlação de 0,69. Em adição, para os valores apresentados por Petrauski *et al.* (2020), trabalhando com eucalipto e dois adesivos, os coeficientes de correlação foram da ordem de 0,5.

Conforme os resultados obtidos pelo teste de Tukey, verificou-se que para a resistência ao cisalhamento na compressão foram estabelecidos cinco níveis, enquanto para a resistência ao cisalhamento na torção foram obtidos apenas dois níveis. Portanto, isto evidencia que a perda de resistência para o ensaio de torção sofre menor influência do ângulo de colagem. Caso tome-se como referência os resultados para os ângulos extremos de 0° e 90°, no ensaio à compressão ocorreu perda de 55% da resistência, enquanto no ensaio à torção houve perda de apenas 18%.

Na Figura 25, apresenta-se o *boxplot* da resistência em função do ângulo de colagem e do tipo de ensaio. Observa-se que as tendências dos formatos das curvas são distintas conforme o ensaio. Com base na distância entre os quartis, foram identificados resultados discrepantes no ensaio na compressão a 90º, e no ensaio na torção a 0º e 80º. Para o ensaio de compressão, a maior resistência média foi encontrada para o ângulo de 20º, enquanto para o ensaio de torção foi para o ângulo de 30º.

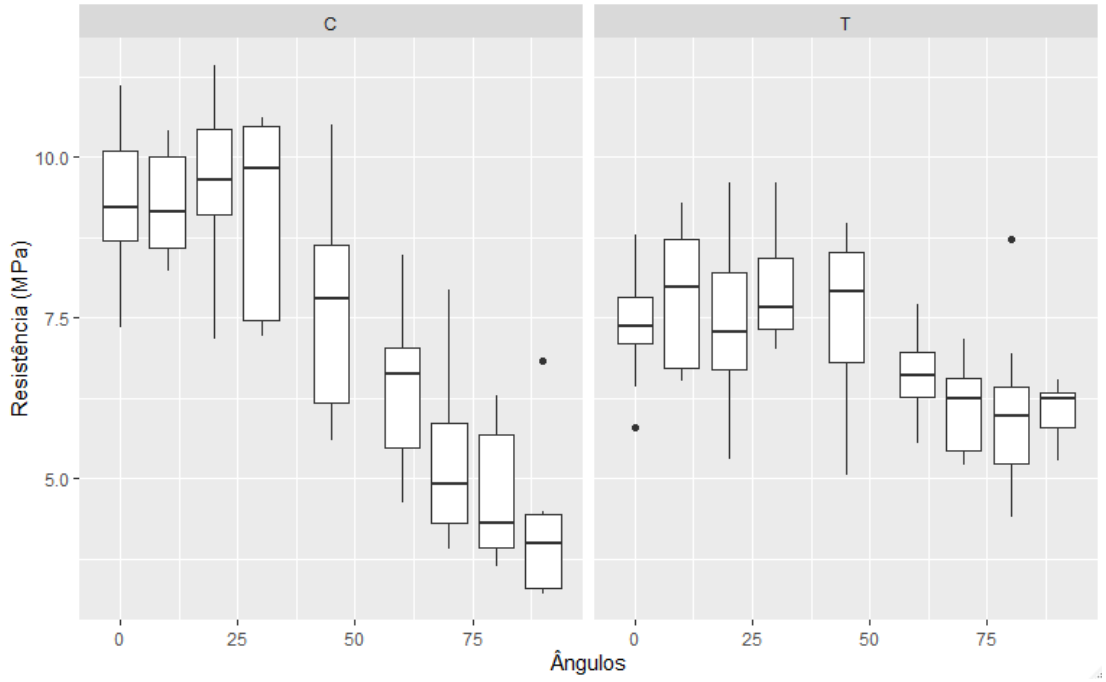


Figura 25 - Gráficos *boxplot* referente a resistência conforme ângulo de colagem para os ensaios de compressão (C) e torção (T).

Fonte: Autora, 2025.

Os valores amostrais de resistência por ensaio e ângulos são apresentados na Figura 26. Nota-se que a resistência ao cisalhamento na torção é menos sensível à variação do ângulo comparado ao ensaio na compressão. Ainda, percebe-se que a partir do ângulo de 45°, as resistências do ensaio de torção se aproximam dos valores do ensaio de compressão, observando que a partir do ângulo de 60°, o ensaio de torção apresenta valores superiores àqueles do ensaio de compressão. Desta forma, as curvas referentes aos ensaios se interseccionariam próximo ao ângulo de 50°.

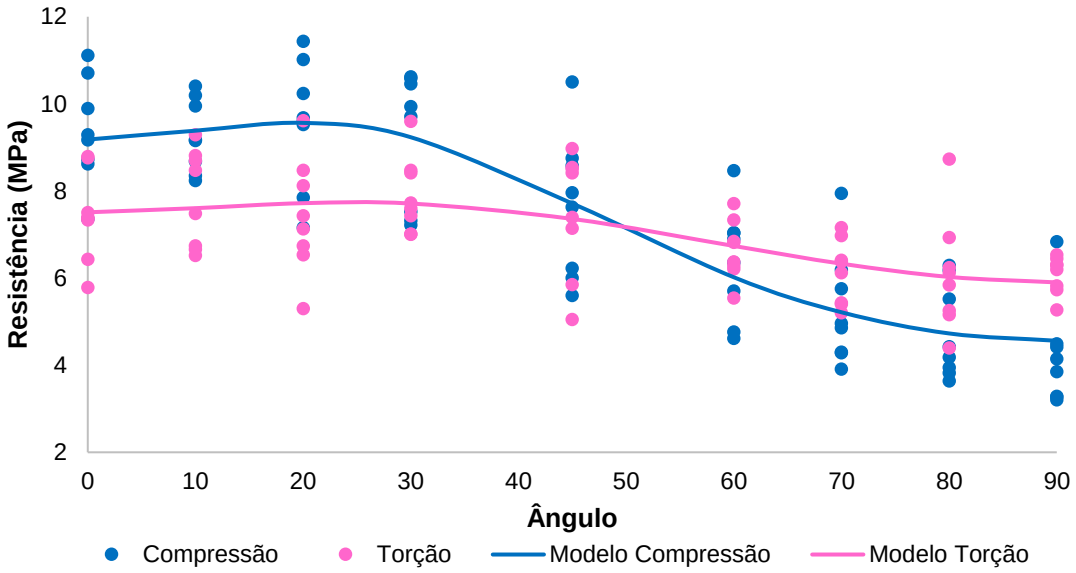


Figura 26 - Resistência amostral e resistência média de acordo com o ângulo de colagem e o ensaio.

Fonte: Autora, 2025.

Nesta pesquisa foi possível verificar que a resistência diminui conforme aumenta-se o ângulo de colagem para os dois ensaios, sendo que o maior e menor valores de resistência ocorrem para a resistência ao cisalhamento na compressão. Assim, para o ensaio na compressão constatou-se um decréscimo de resistência maior que para o ensaio na torção. Ainda, estes ensaios foram estatisticamente diferentes para seis dos nove ângulos estudados. Na Figura 27, procura-se ilustrar diferenças geométricas nos ensaios conduzidos, especialmente quanto aos ângulos entre as tensões geradoras de ruptura e à orientação das fibras das partes envolvidas.

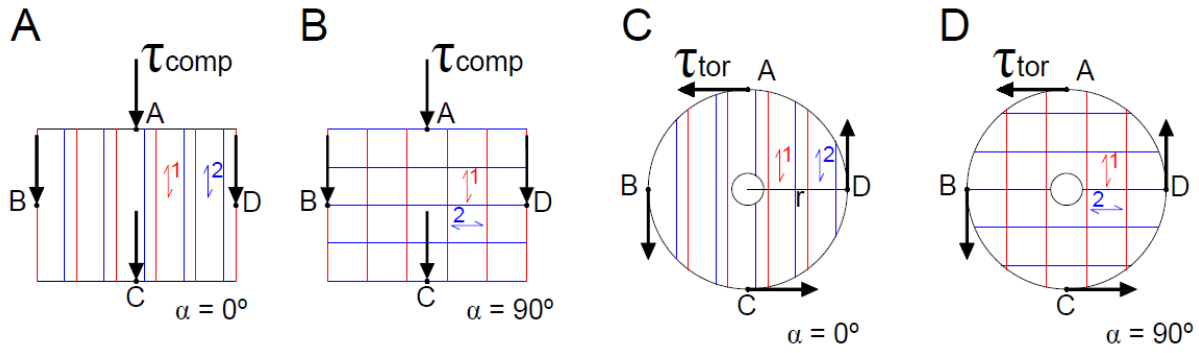


Figura 27 – Esquema de distribuição de tensões para o ensaio de cisalhamento na compressão (A e B) e para o ensaio de cisalhamento na torção (C e D).

Fonte: Autora, 2025.

No caso do ensaio normatizado com ruptura gerada por força de compressão, Figuras 27-A e 27-B, o ângulo formado entre a direção das tensões de cisalhamento na compressão (τ_{comp}) e a direção das fibras de uma das peças coladas, sempre será o próprio ângulo de colagem (α). Admitindo-se, por hipótese, que o melhor desempenho mecânico ocorre para colagens a 0°, e o pior desempenho para colagens a 90°, pode-se avaliar o desempenho no ensaio à torção. Nas Figuras 27-C e 27-D, procura-se ilustrar as tensões de cisalhamento geradas pelo momento de torção, com destaque para o fato de que as direções destas tensões (τ_{tor}) são continuamente variadas e sempre perpendiculares ao raio (r) do círculo envolvido.

Na Figura 27-C, apresenta-se o esquema de uma colagem à 0°, sob torção. Nota-se que apenas para os pontos B e D, a direção das tensões será paralela às fibras, quaisquer que sejam, as peças 1 ou 2. Como consequência, somente nestes 2 pontos ter-se-ia a máxima resistência. Ao contrário, nos pontos A e C, as direções das tensões serão perpendiculares às fibras, com os piores desempenhos esperados. Isto pode explicar o motivo da resistência à torção ser, para o ângulo de 0°, inferior à resistência à compressão para o mesmo ângulo.

Na Figura 27-D, apresenta-se o esquema de uma colagem à 90°, entre as fibras das peças. Perceba-se que para os pontos A, B, C e D, as situações serão idênticas, ou seja, sempre a tensão de cisalhamento será ortogonal às fibras de uma das peças e paralela às fibras da outra. Desta forma, espera-se que a resistência à torção não seja tão baixa quanto a resistência sob compressão para colagens à 90°. Nesta lógica, obteve-se o esperado, ou seja, a resistência à 90° é menor no ensaio

sob compressão. Como consequência, as curvas de ajuste dos resultados tendem a se encontrar em algum ponto intermediário. Nesta pesquisa, isto ocorreu para ângulo próximo de 50°.

Petrauski *et al.* (2020), ao estudarem o desempenho mecânico de juntas de *Eucalyptus* sp., rompidas ao cisalhamento na compressão e na torção, para ângulos de colagem de 0º, 15º, 30º, 45º, 60º, 75º e 90º, constataram diferença estatística entre os ensaios para seis ângulos, exceto para o ângulo de 30º. Ainda, os pesquisadores compararam a aplicação de dois adesivos distintos, um adesivo resorcinol formaldeído e um adesivo poliuretano bicomponente, e observaram que o comportamento das resistências independeu do tipo de adesivo empregado. Os pesquisadores atribuíram a diferença estatística entre os ensaios como sendo consequência da natureza do esforço que atua na região cisalhada. Vale ressaltar que estudos feitos por Couri Petrauski *et al.* (2022), e Padilha *et al.* (2023), relataram a mesma tendência de decréscimo de resistência tanto para o cisalhamento na compressão quanto na torção, sendo que para o ensaio de torção esta queda também foi menos acentuada.

Padilha *et al.* (2023), pesquisaram a resistência ao cisalhamento considerando uma série de nove ângulos de colagem, mas com a utilização de um adesivo poliuretano bicomponente. Assim como, nesta pesquisa, a melhor e a pior resistência encontrada pelos pesquisadores foram para o ensaio na compressão. Os valores de resistência médios para o ensaio na compressão foram de 10,46 MPa (0°) decaindo até 3,9 MPa (90°) e, para o ensaio na torção, variou de 7,13 MPa a 4,52 MPa, para os mesmos extremos.

Para o ensaio de cisalhamento da madeira sólida conforme a ABNT NBR 7190:2022-3, a madeira exibiu resistência média ao cisalhamento de 12,17 MPa, com desvio padrão de 1,48 MPa, valor superior ao obtido nesta pesquisa para o ensaio à compressão com as fibras paralelas entre si cuja média foi de 9,36 MPa, com desvio padrão igual a 1,21 MPa.

Segundo a norma ASTM D 2559 (2016), o valor médio de resistência ao cisalhamento da junta colada deve ser pelo menos 90%, do valor obtido para o ensaio de resistência ao cisalhamento da madeira sólida. Nesta pesquisa, a resistência média ao cisalhamento das juntas coladas com as fibras paralelas entre si foi de 9,36 MPa, equivalendo a 77% da resistência apresentada pela madeira sólida (12,17 MPa). Comparando com a pesquisa feita por Padilha *et al.* (2023), que utilizaram a mesma espécie e lote de madeira, o percentual obtido foi de 86%, indicando desempenho

pouco superior para o adesivo bicomponente. Gonçalves *et al.* (2016), ao confrontarem a resistência ao cisalhamento da madeira de *Pinus* sp. com o desempenho mecânico de cinco adesivos distintos verificaram que somente 3 adesivos conseguiram atingir o limite normativo comentado acima, tratando-se, neste caso, dos adesivos ureia formaldeído, PVA e melamina ureia formaldeído.

O adesivo utilizado, dado que não permitiu desempenho próximo da resistência da madeira sólida, merece ser melhor investigado em pesquisas específicas, com destaque para aquelas que procurem melhores combinações de consumo e pressão de colagem, no sentido da obtenção de melhores desempenhos mecânicos.

2.3.2 Validade do modelo de Hankinson

Ao modelar a curva de Hankinson para os ensaios de cisalhamento na compressão e na torção foram obtidas as Equações 18 e 19, respectivamente.

$$\hat{y}_{iC} = \frac{9{,}18 \times 4{,}56}{9{,}18.\left(sen(\alpha_i)\right)^{2{,}68} + 4{,}56.\left(cos(\alpha_i)\right)^{2{,}68}} \quad (18)$$

$$\hat{y}_{iT} = \frac{7{,}51 \times 5{,}90}{7{,}51.\left(sen(\alpha_i)\right)^{2{,}31} + 5{,}90.\left(cos(\alpha_i)\right)^{2{,}31}} \quad (19)$$

Embora as equações pareçam adequadas para os dois ensaios executados, o coeficiente de determinação foi baixo para o ensaio de Torção (T), sendo que $R_C^2 = 0{,}732$ e $R_T^2 = 0{,}333$. Na Tabela 9 é possível observar os coeficientes estimados no modelo de Hankinson, seus respectivos intervalos de confiança e os coeficientes de determinação.

Tabela 9 - Coeficientes estimados no modelo de Hankinson e seus respectivos intervalos de confiança e coeficiente de determinação

Ensaio	Parâmetros			
	$\hat{f}_{w0_j}$	$\hat{f}_{w90_j}$	$\hat{b}_j$	R_j^2
Compressão	9,18 -- [8,58; 9,81]	4,56 -- [4,10; 5,03]	2,68 -- [2,37; 3,00]	0,732
Torção	7,51 -- [7,03; 8,01]	5,90 -- [5,47; 6,36]	2,31 -- [2,03; 2,60]	0,333

Fonte: Autora, 2025.

Os valores estimados nesta pesquisa se aproximam aos obtidos nos ensaios, sendo que para o ângulo de 0º, obteve-se os valores de resistência de 9,36 e 7,42 Mpa e para o ângulo de 90º, obteve-se 4,18 e 6,07 MPa, para o ensaio de compressão e torção respectivamente.

Os resultados de resistência oriundos do ensaio de compressão conduzem a um formato gráfico semelhante às estimativas provenientes da aplicação da fórmula de Hankinson, exibindo coeficiente de determinação igual a 0,732. Diversos pesquisadores constataram a tendência de decréscimo da resistência de juntas coladas ao cisalhamento na compressão e validaram a fórmula de Hankinson como uma boa estimadora desta resistência (Petrauski *et al.*, 2020; Couri Petrauski *et al.,* 2022; Padilha *et al.,* 2023). A fórmula de Hankinson já é empregada pela ABNT NBR 7190:2022 para determinar algumas resistências da madeira à diferentes ângulos.

Como é possível analisar na Tabela 9, o valor do coeficiente b, expoente dos seno e cosseno na fórmula de Hankinson, variou entre 2,37 a 3 para o ensaio na compressão. A ABNT NBR 7190:2022, utiliza o coeficiente b igual a 2, valor abaixo do encontrado neste estudo. Isto é um indicador que a utilização de b = 2, minoraria os valores de resistência para o lote estudado, estando a favor da segurança, o que numa situação de projeto estrutural é desejável. Já para o ensaio na torção não se recomenda a utilização da fórmula de Hankinson, por conta do baixo coeficiente de determinação exibido pelo ajuste da curva ($R_T^2 = 0{,}333$). Desta maneira, a fórmula de Hankinson parece adequada somente para estimar a resistência ao cisalhamento na compressão.

Embora ambas as curvas apresentem decaimento de resistência, conforme se aumenta o ângulo de colagem, é possível verificar que os comportamentos são distintos caso o esforço atuante seja por cisalhamento na compressão ou na torção.

Desta forma, o estudo de ambos os esforços é importante para o dimensionamento estrutural de ligações coladas, principalmente na execução de pórticos, como pesquisas feitas anteriormente já evidenciaram (Couri Petrauski *et al.*, 2016; Stringari *et al.*, 2020; Possa *et al.*, 2022; Couri Petrauski *et al.*, 2022; Filippini *et al*., 2023).

2.3.3 Falha na madeira

Na Tabela 10 apresenta-se os resultados médios do percentual de falha na madeira, segundo ensaio e ângulo de colagem.

Tabela 10 - Percentual de falha média segundo ensaio e ângulo de colagem

Ângulos	**Percentual de falha média (%)**	
	Compressão	**Torção**
0°	29,56 (113)	15,62 (82,14)
10°	24,88 (25,84)	27,78 (69,47)
20°	26,77 (74,60)	17,94 (85,67)
30°	26,20 (52,52)	30,52 (53,01)
45°	35,20 (60,96)	25,42 (58,85)
60°	38,62 (61,37)	47,28 (50,19)
70°	36,27 (70,43)	38,41 (58,73)
80°	33,75 (70,43)	33,50 (63,91)
90°	46,69 (41,23)	61,25 (23,82)

Nota: Em parênteses estão os coeficientes de variação (C.V.%).

Fonte: Autora, 2025.

Para os percentuais de falha na madeira houve uma grande variabilidade nos dois ensaios, incluindo os resultados por ângulos. No ensaio à compressão obteve-se o percentual médio geral de 33,10%, e para o ensaio à torção este valor foi de 33,08%, resultados muito próximos. Os coeficientes de variação médios observados foram superiores a 60% para os dois ensaios.

A ASTM D 2559 (2016), recomenda a utilização de adesivos que apresentem percentuais médios de, no mínimo, 75%. Os percentuais médios de falha na madeira desta pesquisa não foram superiores a 47%, para o ensaio na compressão e a 61%, para o ensaio na torção, ambos inferiores ao recomendado por essa norma. Tomé *et*

al. (2023), utilizando a mesma espécie de madeira e adesivo 1C-PUR, também encontraram valores baixos de percentual de falha na madeira, com média em torno de 28%.

Uma das possíveis causas da variabilidade dos percentuais de falha na madeira pode ser atribuída à subjetividade do avaliador na análise, conforme destacam Lopes *et al.* (2013), Pimentel *et al.* (2021), e Tomé *et al.* (2023). Adicionalmente, Tomé *et al.* (2023), comentam que pode haver dificuldade em visualizar se a falha está na madeira ou na linha de cola, principalmente quando a cor do adesivo se assemelhar a cor da madeira. Conforme ilustra a Figura 22, este risco existe.

Segundo Müller *et al.* (2009), em um estudo feito sobre a resistência ao cisalhamento no plano colado de adesivos 1C-PUR, os adesivos poliuretanos possuem um menor percentual de falha na madeira por conta da estrutura química e das propriedades mecânicas do adesivo, apresentando maior ductilidade e menor rigidez na linha de cola. Além disso, concluíram que é possível se obter uma ligação estável e confiável com a utilização deste grupo de adesivos.

2.4 CONCLUSÃO

A resistência ao cisalhamento foi afetada pelo ângulo de colagem, especialmente quando o ensaio foi executado na compressão. Já o desempenho mecânico observado no ensaio sob compressão mostrou-se diferente do desempenho obtido no ensaio sob torção.

O modelo de Hankinson, pode ser utilizado como estimador da resistência ao cisalhamento sob compressão de juntas coladas à diferentes ângulos e, de forma contrária, não se recomenda o uso deste modelo para estimar a resistência sob torção.

Embora não tenha sido o objetivo principal da pesquisa, o desempenho mecânico de juntas coladas paralelas atingiu apenas 77% da resistência da madeira sólida, e os percentuais de falha na madeira observados foram sistematicamente baixos, para todos os ângulos de colagem, independentemente do ensaio.

Consideradas esta e outras pesquisas similares realizadas anteriormente por outros pesquisadores, há evidências de que o desempenho mecânico para colagens em diferentes ângulos manifesta-se de maneira semelhante, independentemente do adesivo utilizado.

Dadas as condições de desenvolvimento desta pesquisa, sugere-se a condução de trabalhos similares com o emprego de outros adesivos e outras espécies de madeira, especialmente aquelas aptas ao reflorestamento e, adicionalmente, buscar correlações entre percentuais de falha e a densidade da madeira. Além disso, sugere-se o estudo e, eventual proposição, de um modelo unificado para estimar a resistência ao cisalhamento na torção para diferentes ângulos de colagem à semelhança do que ocorre com a fórmula de Hankinson, no ensaio sob compressão.

3. CAPÍTULO III. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE JUNTAS COLADAS COM ADESIVO EPÓXI PARA DIFERENTES GRAMATURAS E PRESSÕES

POSSA, Desirè Coraça; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2025. **Resistência ao cisalhamento de juntas coladas com adesivo epóxi para diferentes gramaturas e pressões.** Professor orientador Dr. Alfredo Petrauski. Professor coorientador Dr. Mateus Couri Petrauski.

RESUMO

Em elementos estruturais de MLC, a quantidade de adesivo e a pressão de colagem utilizadas para a confecção de juntas de madeira são parâmetros fundamentais para garantir uma boa colagem e, consequentemente, um bom desempenho mecânico. A resistência do plano colado pode ser comprometida se a gramatura e/ou a pressão forem maiores ou menores do que as ideais, afetando diretamente a resistência do produto. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho mecânico de juntas de *Pinus* sp. coladas com adesivo epóxi Araldite, para diferentes níveis de pressão (0,6; 0,8; 1,0 e 1,2 MPa), e gramatura de adesivo (80, 150, 200, 250, 300 e 350 $g.m^{-2}$). As peças foram separadas em seis blocos conforme a sua densidade aparente. Para cada bloco foram confeccionadas 24 juntas, resultantes das combinações das diferentes gramaturas e pressões. Após a colagem, as juntas foram subdivididas em três corpos de prova, gerando um total de 432 resultados de teste. Os resultados evidenciaram que o adesivo epóxi é adequado para uso em estruturas de madeira lamelada colada, pois todos os tratamentos atenderam aos requisitos normativos. Observou-se que pressões mais elevadas reduziram a resistência da junta colada. Já o consumo de adesivo não apresentou efeito significativo na resistência, porém recomenda-se uma gramatura mínima de 150 $g.m^{-2,}$ para garantir melhor trabalhabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira lamelada colada; Adesão, Colagem.

POSSA, Desirè Coraça; Western Paraná State University. February 2025. **Shear strength of bonded joints with epoxy adhesive for different grammages and pressures.** Advising Professor Dr. Alfredo Petrauski. Co-advising Professor Dr. Mateus Couri Petrauski.

ABSTRACT

In structural elements of Glulam, the quantity of adhesive and the bonding pressure used in the creation of wood joints are crucial parameters for ensuring strong adhesion. If the grammage and/or pressure are too high or too low, the strength of the bond may be compromised, directly affecting the overall durability of the product. The aim of this study was to assess the mechanical performance of *Pinus* sp. joints bonded with Araldite epoxy adhesive at varying pressure levels (0.6, 0.8, 1.0, and 1.2 MPa) and adhesive grammages (80, 150, 200, 250, 300, and 350 $g.m^{-2}$). The specimens were categorized into six groups based on their apparent density. For each group, 24 joints were made, resulting from combinations of different grammages and pressures. After bonding, the joints were divided into three test specimens, totaling 432 test results. The shear strength results obtained from the various bonding pressures and adhesive consumptions were satisfactory. The adhesive was found to be appropriate for use in glued laminated timber structures under all the studied conditions. It was observed that higher bonding pressures led to lower strength, while adhesive consumption had no significant effect on the strength. However, it is recommended that adhesive consumption should not be lower than 150 $g.m^{-2}$ for better workability.

KEYWORDS: Glulam; Adhesion, Bonding.

3.1 INTRODUÇÃO

Por conta das restrições impostas pela legislação há uma busca no setor florestal pela expansão de florestas plantadas para atender a demanda por matéria prima florestal que, por muitos séculos, foi provida por florestas nativas (Mendonza *et al.*, 2017). Porém, a madeira proveniente de espécies de rápido crescimento normalmente apresenta propriedades inferiores em relação à quantidade de defeitos, durabilidade e resistência, quando comparada à madeira madura de florestas nativas (Komariah *et al.,* 2015).

No caso de elementos estruturais, a madeira deve apresentar alta resistência, bem como permitir execução de peças com maiores seções transversais e vãos livres (Komariah *et al.*, 2015). Diante dessas necessidades, a madeira de reflorestamento pode ser viabilizada, principalmente aquelas de baixa a média densidade, por meio da sua colagem para obter peças de maiores dimensões e, no processo de seleção, conseguir melhorar seu desempenho (Mendonza *et al.*, 2017; Segundinho *et al.*, 2021).

A madeira lamelada colada (MLC) é um produto fabricado a partir da madeira com grande utilização no setor de construção civil, principalmente por suas propriedades físico-mecânicas e processo de fabricação industrializado (Hadi *et al.*, 2021; Segundinho *et al.*, 2021). A MLC é constituída por lamelas com espessura máxima de 5 cm, unidas por adesivo, com as fibras das peças paralelas ao seu comprimento. As lamelas podem apresentar diferentes espessuras, larguras e comprimentos, visando obter peças de dimensões e qualidades desejadas (Trianoski *et al.*, 2020).

O processo de colagem da madeira é uma técnica que depende de diversas variáveis, incluindo desde as características da madeira utilizada até as propriedades do adesivo (Mendonza *et al.,* 2017). Segundo Frihart e Hunt (2021), o adesivo precisa umedecer a superfície da madeira, permitindo a transferência de cargas com adesão e coesão adequadas. Uma boa adesão e coesão resultam de processos físicos e reações químicas que ocorrem durante a cura do adesivo.

A qualidade da colagem pode ser avaliada objetivamente por diferentes ensaios normativos os quais consideram também o uso final do produto. No âmbito de peças estruturais de MLC é mais frequente julgar a resistência mecânica ao cisalhamento no plano colado usando, por exemplo, a metodologia da ASTM D 905

(2013). Neste contexto, ainda, é essencial estudar e compreender as características de cada adesivo utilizado no processo de colagem para otimizar seu uso, melhorar a qualidade da peça e reduzir custos. Cada adesivo possui propriedades específicas que o diferenciam dos demais (Mendonza *et al.,* 2017).

Além disso, a quantidade de adesivo e a pressão utilizada para a confecção de juntas de madeira são parâmetros fundamentais para garantir uma colagem de qualidade. A resistência do plano colado pode ser comprometida se a gramatura for maior ou menor do que o ideal, afetando diretamente a resistência do produto. Quando a quantidade de adesivo é insuficiente, a aderência e a ancoragem ficam prejudicadas, reduzindo a resistência. Por outro lado, o excesso de adesivo pode escorrer pelas bordas, causando desperdício e resultando em perdas econômicas (Trianoski *et al.*, 2020; Tomé *et al.,* 2023).

Alguns trabalhos procuraram avaliar a resistência de juntas coladas com diferentes pressões de colagem e quantidade de adesivo, utilizando adesivos como o fenol-formaldeído, melamina-formaldeído, resorcinol-formaldeído, silicato de sódio, acetato de polivinila, poliuretano à base de mamona e poliuretano monocomponente (Bianche *et al.*, 2017; Tomé *et al.*, 2023). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho mecânico de juntas de *Pinus* sp. coladas com adesivo epóxi Araldite visando recomendar melhores combinações de pressão de colagem e gramatura de adesivo.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Toda a parte experimental desta pesquisa foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia – LEME e no Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira – LATEM do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas – CCET da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, no Campus de Cascavel–PR.

Os materiais utilizados foram a madeira de *Pinus* sp. e o adesivo à base de resina epóxi. A madeira foi adquirida no comércio local da cidade de Cascavel-PR, tendo sido possível selecionar as tábuas mais adequadas para o estudo. O lote de madeira apresentou densidade aparente variando entre 0,476 a 0,770 g.cm^{-3}, com média de 0,607 g.cm^{-3}, para um teor de umidade da ordem de 12,4%.

O adesivo utilizado é produzido e comercializado pela Tekbond® sendo este um adesivo bicomponente à base de resina epóxi com nome comercial de Araldite Profissional. O fabricante orienta a proporção, em massa, de 1:0,8 de resina e endurecedor e tempo em fechado inferior a 60 minutos. Inicialmente, tentou-se aplicar o adesivo com o auxílio de uma trincha. Na Figura 28 é possível visualizar as colorações dos componentes do adesivo, tendo sua massa pesada em sobre uma placa acrílica, antes de ser misturado. O componente de cor amarelada é o endurecedor (B), enquanto o de cor esbranquiçada é a resina (A).

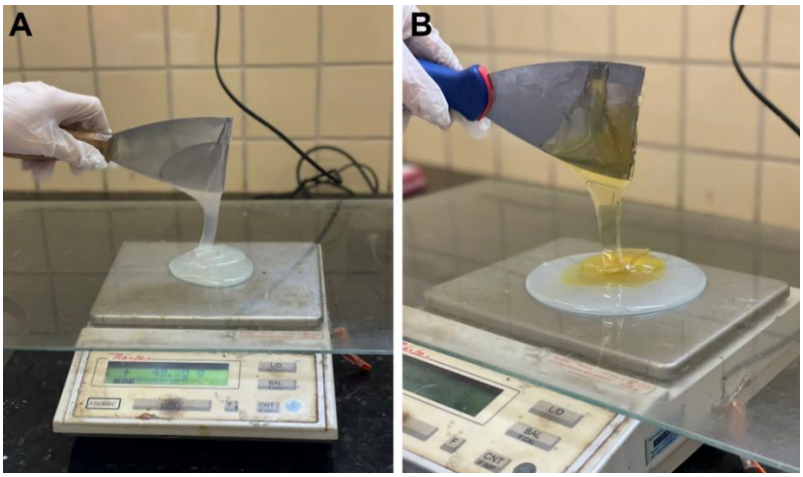


Figura 28 – Pesagem dos componentes do adesivo epóxi Araldite profissional: (A) resina; e (B) endurecedor.

Fonte: Autora, 2025.

Conforme a ficha técnica (Tekbond, 2023), o tempo de cura do adesivo é de 24 horas, e o adesivo tem potencial para desenvolver uma resistência ao cisalhamento de 17,6 Mpa, após cinco dias de colagem, sendo esse valor encontrado a partir de juntas de metal coladas e ensaiadas conforme a norma ASTM D 1002 (2019). Em todos os procedimentos de colagem o adesivo foi misturado por um período de 2 min, e aplicado em apenas uma das faces de uma das peças a serem unidas. O adesivo foi espalhado com o auxílio de uma espátula metálica uma vez que sua viscosidade impede o uso de trincha.

3.2.1 Preparação das juntas coladas com adesivo epóxi

O experimento foi conduzido para avaliar as melhores combinações de consumo de adesivo e pressão para se obter um bom desempenho mecânico. O fabricante do adesivo não apresenta nenhuma recomendação de consumo ou de pressão. Desta forma, optou-se por estabelecer seis níveis de gramatura e quatro níveis de pressão.

A ABNT NBR 7190:2022-1, orienta utilizar uma pressão mínima de 0,7 Mpa, para madeiras de densidade inferior ou igual a 0,5 $g.cm^{-3}$, e de 1,2 Mpa, para madeiras de densidade superior a 0,5 $g.cm^{-3}$. Para abranger esse intervalo de pressão, considerando a madeira disponível, optou-se por desenvolver o estudo com os seguintes níveis de pressão: 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2 MPa.

Para a gramatura do adesivo foi feito um estudo preliminar para verificar qual a menor quantidade que seria possível aplicar e, também, se haveria diferença no resultado de resistência obtido aplicando-se o adesivo em apenas uma face ou nas duas faces das juntas. A partir disso, as gramaturas do adesivo foram fixadas em: 80, 150, 200, 250, 300 e 350 $g.m^{-2}$, e optou-se por aplicar o adesivo em apenas uma face. Assim, as pressões e os consumos de adesivo foram combinados, resultando em um delineamento com 24 tratamentos distintos. Na Tabela 11 são expostos alguns resultados deste estudo preliminar com destaque para o fato de que não houve vantagem na prática de aplicar-se adesivo em ambas as faces das juntas.

Tabela 11 – Resultados do estudo preliminar feito para o adesivo epóxi

Consumo ($g.m^{-2}$)	Face	Nº de corpos de prova	Resistência média (MPa)	C.V. (%)
150	1	14	10,31	16,85
	2	15	10,30	14,69
250	1	15	11,17	8,07
	2	15	10,59	7,53

Fonte: Autora, 2025.

Devido à variabilidade da densidade aparente da madeira, dividiu-se o lote em seis blocos (B1 a B6), com o intuito de evitar favorecimento por tratamento. Ainda, selecionou-se somente peças que apresentavam a orientação dos anéis de crescimento na diagonal em relação ao plano de colagem. Desta forma, para cada

bloco de densidade foram confeccionadas 24 juntas, conforme os tratamentos estabelecidos. A colagem foi realizada utilizando-se duas lamelas e o tratamento utilizado foi sorteado aleatoriamente para cada uma das juntas de cada bloco. No total foram confeccionadas 144 juntas que, após o tempo de cura do adesivo, foram subdivididas em três réplicas com o registro da ordem de extração, conforme ilustra-se na Figura 29. Posteriormente, utilizou-se a mediana dos três valores de resistência obtidos para conduzir a análise estatística, a fim de reduzir a variabilidade ambiental/residual, visto que, resultados extremos (alto e baixo demais) impactam significativamente na análise.

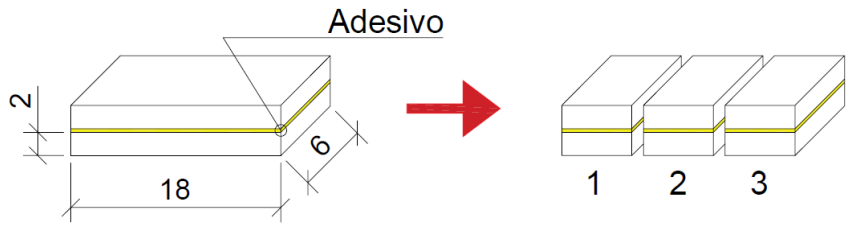


Figura 29 – Juntas coladas com o adesivo epóxi Araldite para a obtenção de três corpos de prova, dimensões em cm.

Fonte: Autora, 2025.

Foi possível confeccionar um bloco de densidade por dia, o tempo em aberto foi nulo e o tempo em fechado foi de 30 minutos. As juntas foram coladas com umidade média de 12,8 ± 0,72%, em ambiente que possibilitou o controle da temperatura em aproximadamente 25°C. As pressões foram aplicadas com o auxílio de um torquímetro digital da marca Wisretec e passados 30 minutos foi dado reaperto. As juntas ficaram sob pressão por um período de 12 horas. Na Figura 30 estão ilustrados os corpos de prova de acordo com a sua densidade aparente de forma decrescente. Além da densidade, vale ressaltar que buscou-se confeccionar juntas com anatomia semelhante em relação à orientação dos anéis de crescimento, neste caso, com anéis dispostos aproximadamente diagonais em relação ao plano colado.

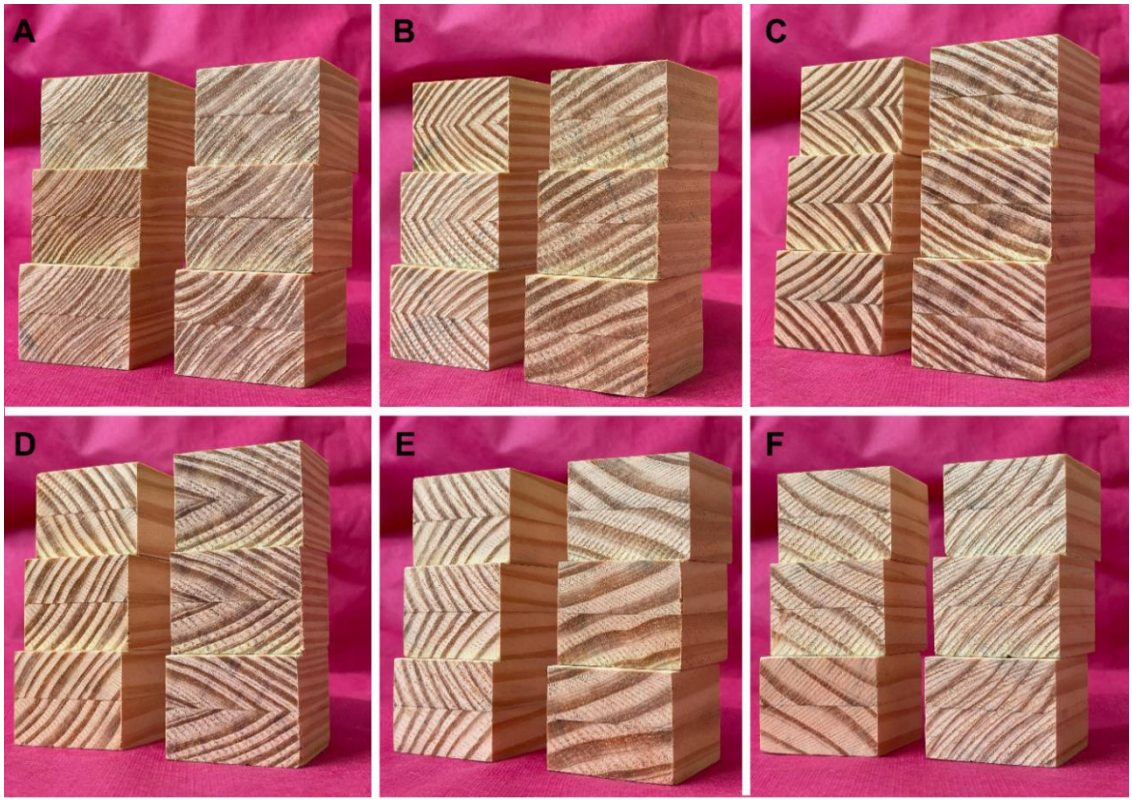


Figura 30 – Corpos de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento representando os blocos conforme a densidade aparente em ordem decrescente, sendo estes: Bloco 1 (A), Bloco 2 (B), Bloco 3 (C), Bloco 4 (D), Bloco 5 (E) e Bloco 6 (F).

Fonte: Autora, 2025.

3.2.2 Resistência das juntas coladas

Foi realizado o ensaio conforme a ASTM D 905 (2013), para estimar a resistência ao cisalhamento das juntas coladas. Não foi adotada a metodologia proposta pela ABNT NBR 7190:2022-6, uma vez que esta norma exige a execução de vigas em MLC, e implicaria em maior consumo de madeira, dificultando também a obtenção de lamelas isentas de defeitos. Para teste, cada corpo de prova foi posicionado em um aparato específico e submetido ao esforço de cisalhamento até a sua ruptura em uma prensa servocontrolada, conforme ilustra a Figura 21. Após o ensaio, foi verificado o teor de umidade de cada corpo de prova para corrigir o valor de resistência para a umidade-padrão de 12%, de acordo com a ABNT NBR 7190:2022-1.

3.2.3 Análise estatística da resistência

A densidade aparente da madeira foi considerada como um fator de controle e admitida como blocos. Os valores médios de densidade, por bloco, foram: B1 =0,705 g.cm^{-3}; B2= 0,653 g.cm^{-3}; B3 = 0,623 g.cm^{-3}; B4 = 0,591 g.cm^{-3}; B5 = 0,563 g.cm^{-3} e B6 = 0,519 g.cm^{-3}.

As análises estatísticas foram realizadas avaliando descritivamente os dados por meio de gráficos e medidas de posição, tais como valor máximo, mínimo, média e dispersão (amplitude e coeficiente de variação). Além disso, foi empregado o delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas, sendo os grupos de densidade os blocos, o consumo (quantidade de adesivo), como efeito principal e a pressão como fator secundário aplicado no mesmo corpo de prova. No total foram utilizados 144 valores medianos da resistência, sendo excluído o valor máximo e mínimo em cada combinação bloco *versus* tratamento. Esses resultados são as respostas (y_{ijk}); denominadas variáveis dependentes, sendo utilizado o modelo da Equação 20.

$$y_{ijk} = \mu + \beta_i + C_j + e_{ij} + P_k + CP_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (20)$$

Em que: ; μ é o efeito médio geral; β_i é o efeito do i –ésimo grupo/bloco de densidade; C_j é o efeito da j-ésima quantidade de adesivo (consumo); e_{ij} é o efeito do erro a nível de parcelas, com distribuição Normal de média zero e variância σ_1^2; P_k é o efeito do k-ésimo nível de pressão; CP_{jk} é o efeito da interação entre o j-ésimo consumo de adesivo e a k-ésima pressão; ε_{ijk} é o erro experimental associado subparcelas, com distribuição Normal de média zero e variância σ_2^2; i= 1, 2, ..., 6; j= 1, 2,..., 6 e k=1, 2, 3, 4. Para estimar a resistência ao cisalhamento, adotou-se a Equação 21, para a análise de regressão.

$$y_{ijk} = a + b\beta_i + cC_j + dP_k + fCP_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (21)$$

Em que: a é o coeficiente médio da resistência (intercepto); b é o coeficiente angular relacionado ao bloco (bloco de densidade); c é o coeficiente angular relacionado ao consumo, d é referente a pressão e f é referente ao efeito da interação

consumo e pressão. As análises foram desenvolvidas no software R (R Core Team, 2023), com o pacote nlme. Para todas as inferências foi assumido nível de significância de 5%.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Densidade aparente e orientação dos anéis de crescimento

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da densidade aparente conforme o bloco e na Figura 31, ilustra-se os *boxplots* da densidade aparente, de acordo com o bloco para cada um dos corpos de prova.

Tabela 12 - Resultados da densidade aparente por bloco

	Bloco					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Nº de corpos de prova	72	72	72	72	72	72
Mínimo (g.cm^{-3})	0,637	0,619	0,595	0,552	0,514	0,477
Máximo (g.cm^{-3})	0,770	0,717	0,659	0,645	0,607	0,575
Média (g.cm^{-3})	0,705	0,653	0,623	0,591	0,563	0,519
C.V. (%)	4,43	2,73	2,60	3,21	3,77	4,60

Fonte: Autora, 2025.

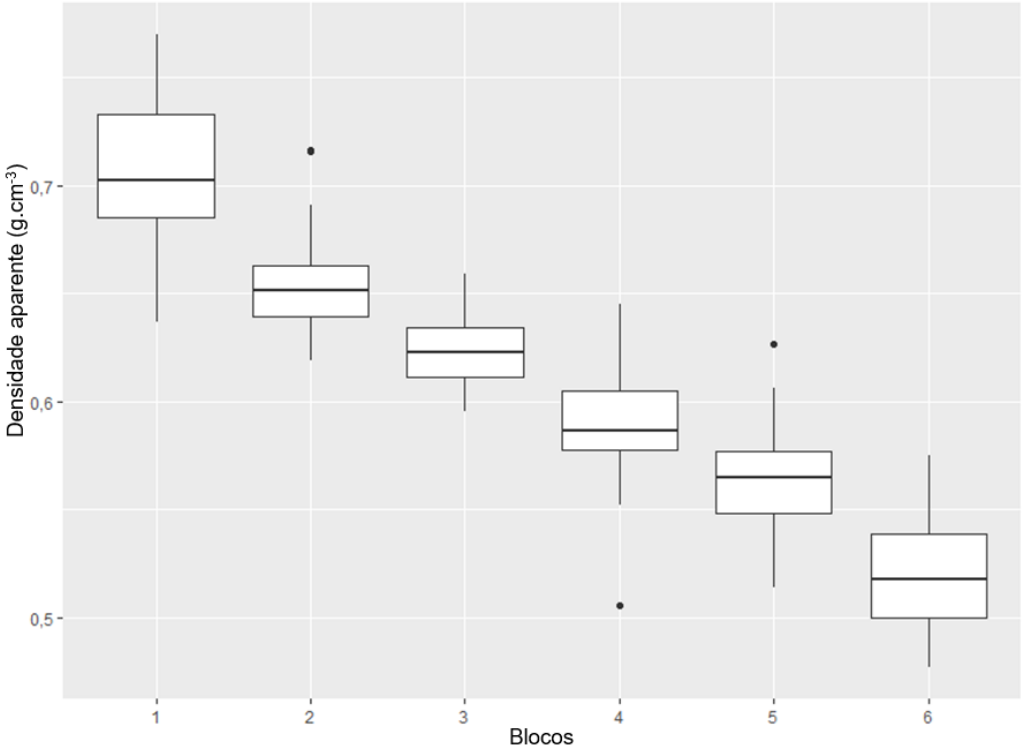


Figura 31 – *Boxplot* da densidade aparente dos corpos de prova conforme o bloco.

Fonte: Autora, 2025.

A partir dos *boxplots* observa-se, que a densidade aparente decresceu, conforme planejado. Contudo, para três blocos houve um valor discrepante em cada um, para os blocos 2, 4 e 5.

Como a densidade aparente foi obtida quando as peças tinham 50 cm de comprimento, acredita-se que esse fator de controle possa ter variado após a extração das peças nos comprimentos finais de 18 cm. Além disso, como a madeira é um material anisotrópico e heterogêneo é comum, a alta variação da densidade nos diferentes sentidos do crescimento da árvore (medula-casca e base-copa), especialmente, em espécies de coníferas (Mendes *et al.*, 1999; Melo *et al.*, 2010; Albino *et al.*, 2012; Rios *et al.*, 2018; Soares *et al.*, 2021).

Em relação ao coeficiente de variação, Pimentel-Gomes (2022), destaca que é uma estatística associada à precisão do experimento, sendo que quanto menor este percentual mais homogêneos são os dados. Desta forma, nota-se que para todos os blocos a densidade aparente apresentou baixa variabilidade, com o coeficiente de variação não ultrapassando os 5%, concluindo-se que foi satisfatório o controle deste fator.

Outro controle adotado foi a seleção de peças que apresentavam a orientação dos anéis de crescimento na diagonal em relação ao plano de colagem. Porém, após a subdivisão das juntas, alguns corpos de prova apresentaram orientação distinta da pré-definida. Conforme ilustra-se na Figura 32, após a extração, verificou-se que dos 432 corpos de prova confeccionados, 23 corpos de prova apresentaram a orientação dos anéis de crescimento na radial e 21 corpos de prova apresentaram na tangencial, ambos em relação ao plano de colagem.

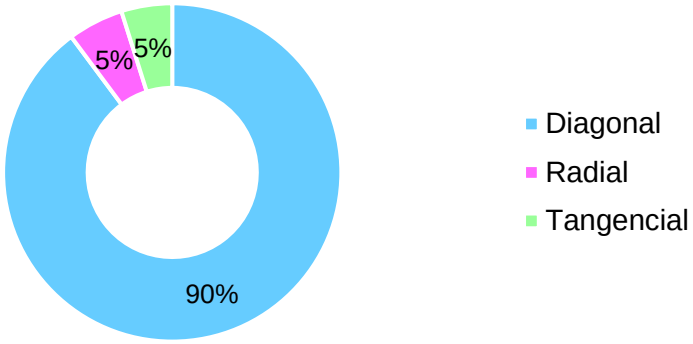


Figura 32 – Percentual de corpos de prova conforme a orientação dos anéis de crescimento em relação ao plano de colagem.

Fonte: Autora, 2025.

3.3.2 Resistência das juntas coladas com adesivo epóxi

Na Tabela 13, apresenta-se os valores médios e o coeficiente de variação da resistência ao cisalhamento das juntas coladas conforme o consumo de adesivo e pressão de colagem. As resistências obtidas para cada corpo de prova estão detalhadas no Apêndice B.

Tabela 13 - Valores médios da resistência ao cisalhamento conforme consumo, pressão e médias por nível da variável estudada

Consumo ($g.m^{-2}$)	**Pressão (MPa)**				**Média**
	0,6	**0,8**	**1,0**	**1,2**	
80	12,25 (12,00)	13,25 (11,24)	13,01 (13,37)	11,43 (12,86)	12,48(12,98)
150	14,17 (9,95)	13,33 (6,60)	13,19 (8,72)	13,00 (12,23)	13,42 (9,54)
200	14,01 (15,63)	12,84 (7,08)	13,36 (7,63)	12,68 (10,73)	13,22 (11,04)
250	13,15 (10,95)	12,89 (6,20)	13,62 (9,25)	11,50 (4,69)	12,79 (10,00)
300	13,86 (17,24)	13,86 (7,06)	13,04 (11,04)	12,46 (7,06)	13,31 (11,79)
350	14,02 (15,26)	13,18 (4,17)	13,47 (11,80)	12,56 (11,07)	13,31 (11,42)
Média	13,58 (13,84)	13,23 (7,40)	13,28 (9,86)	12,27 (10,76)	13,09 (11,31)

Nota: Em parênteses estão os coeficientes de variação (C.V.%).

Fonte: Autora, 2025.

Os valores de resistência variaram, em média, entre um mínimo de 11,43 Mpa, e um máximo de 14,17 Mpa, para tratamentos com pressões e consumos diferentes. O de menor valor resistente foi o tratamento de maior pressão e menor consumo. O tratamento que apresentou maior resistência foi aquele de menor pressão e consumo imediatamente superior ao menor estudado. Quanto à variabilidade experimental, a ABNT NBR 7190:2022-1, permite coeficientes de variação de 28%, para resultados relacionados às tensões de cisalhamento. Nesta pesquisa, para todos os tratamentos estudados os coeficientes de variação puderam ser considerados satisfatórios uma vez que os CV's obtidos ficaram no intervalo entre 4,17% a 17,24%, portanto, no máximo, 60% da referência normativa. Ainda, a partir do apresentado na Tabela 13, foi possível observar que com o aumento da pressão de colagem houve um decréscimo nos valores de resistência obtidos. Ao contrário, em relação ao consumo de adesivo, a tendência não é clara. Contudo, tomando-se o menor consumo estudado (80 $g.m^{-2}$), comparativamente ao consumo imediatamente superior (150 $g.m^{-2}$), houve acréscimo de resistência da ordem de 7,5%. Para os incrementos seguintes percebeu-se tanto acréscimo como decréscimo ou mesmo a manutenção das resistências. No caso destas variações, foram inferiores a 4%. Nas Figuras 33 e 34, ilustram-se as resistências medianas em relação a pressão, conforme os consumos de adesivo adotados e as resistências medianas em relação ao consumo de adesivo, conforme as pressões de colagem, respectivamente.

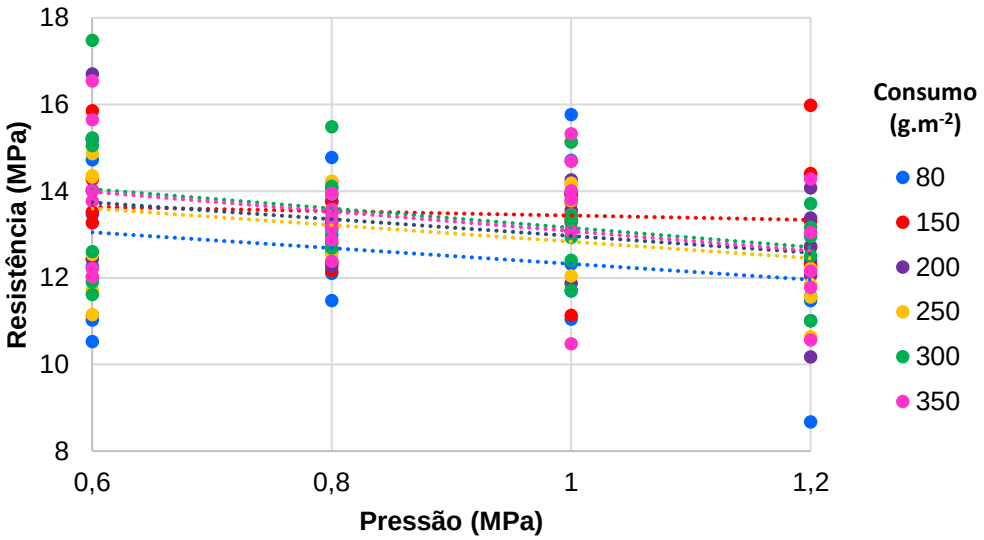


Figura 33 – Gráfico resistência x pressão de colagem para cada consumo de adesivo.

Fonte: Autora, 2025.

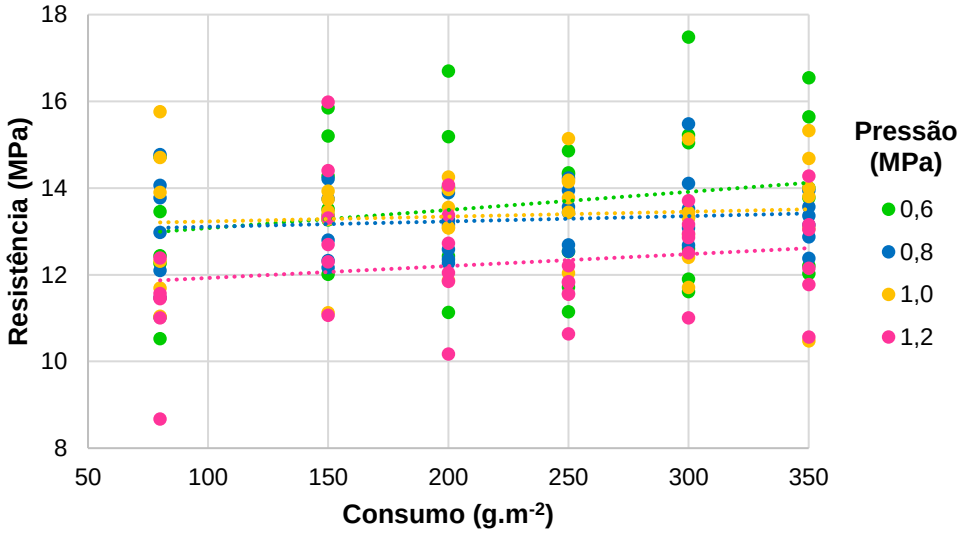


Figura 34 – Gráfico resistência x consumo de adesivo para cada pressão de colagem.

Fonte: Autora, 2025.

Ao analisar as linhas de tendência geradas e apresentadas nas Figuras 31 e 32, a partir dos 144 valores das medianas, percebe-se, preliminarmente, que a pressão e o consumo de adesivo poderiam influenciar na resistência. Assim, a

resistência diminui com o aumento da pressão de colagem, independentemente do consumo de adesivo, e aumenta com maiores consumos de adesivo, independentemente da pressão. Ao avaliar o modelo matemático do experimento (Equação 20), as condições de normalidade e homogeneidade de variâncias foram satisfeitas. Assim, os efeitos foram avaliados quanto a sua significância. Note-se, na Tabela 14, que não existiu efeito significativo da variável consumo e da interação entre os fatores consumo e pressão. Apenas a variável pressão apresentou efeito significativo. Vale ressaltar que os blocos de densidade também foram significativos.

Tabela 14 - Quadro da ANOVA com parcela subdividida da resistência

Fontes de variação	G.L.	Soma de Quadrados	Teste F	p-valor
Blocos de densidade	5	63,255	8,369	**<0,0001**
Consumo	5	16,251	2,150	0,0591
Erro na parcela	25	37,793		
Pressão	3	34,583	7,380	**0,0003**
Consumo × Pressão	15	18,943	0,808	0,7122
Erro na subparcela	90	140,585		

CV1 = 9,39%; CV2= 9,55%

Fonte: Autora, 2025

Como o efeito da interação não foi significativo, no modelo de regressão avaliado (Equação 21), assumiu-se o coeficiente f = 0, ou seja, não é relevante na análise. Como consequência, a estimativa da resistência ao cisalhamento das juntas coladas com o adesivo à base de resina epóxi pode ser descrita a partir do modelo de regressão apresentado na Equação 22.

$$y_{ijk} = 13{,}345 + 0{,}259\beta_i + 0{,}275C_j - 0{,}579P_k \quad (22)$$

Ao realizar-se o desdobramento da ANOVA em regressão linear (Tabela 15), constatou-se que os coeficientes interceptos, blocos de densidade e pressão são significativos. Entretanto, a qualidade de ajuste desse modelo foi baixa, com R^2 ajustado igual a 0,267, o que demonstrou que a Equação 22, não foi adequada para estimar a resistência.

Tabela 15 – Coeficientes dos parâmetros de regressão juntamente com o erro padrão associado e o teste T com o valor descritivo (valor p)

Coeficiente de regressão	Estimativa	Erro padrão	Teste T	Valor p
Intercepto	13,345	0,258	51,768	**<0,001**
Blocos de densidade	0,259	0,065	-3,964	**<0,001**
Pressão	-0,579	0,141	-4,100	**<0,001**
Consumo	0,275	0,165	1,668	0,097

Fonte: Autora, 2025.

Na Figura 35, ilustra-se o *boxplot* da resistência em função dos blocos de densidade aparente. De modo geral, percebe-se que a resistência tendeu a diminuir à medida que diminui a densidade aparente dos blocos, com exceção do bloco 6. Nota-se, contudo, que o bloco de maior densidade apresentou três valores discrepantes, conforme as distâncias entre os quartis. Ainda, os blocos 2 e 3 exibiram valores discrepantes, um em cada bloco. Os dois valores abaixo do primeiro quartil, apresentado pelo bloco 1, são para a maior pressão de colagem (1,2 MPa), e os três valores acima do terceiro quartil foram para a menor pressão (0,6 MPa). As maiores variabilidades de resistência foram para o bloco 1 e 6, respectivamente.

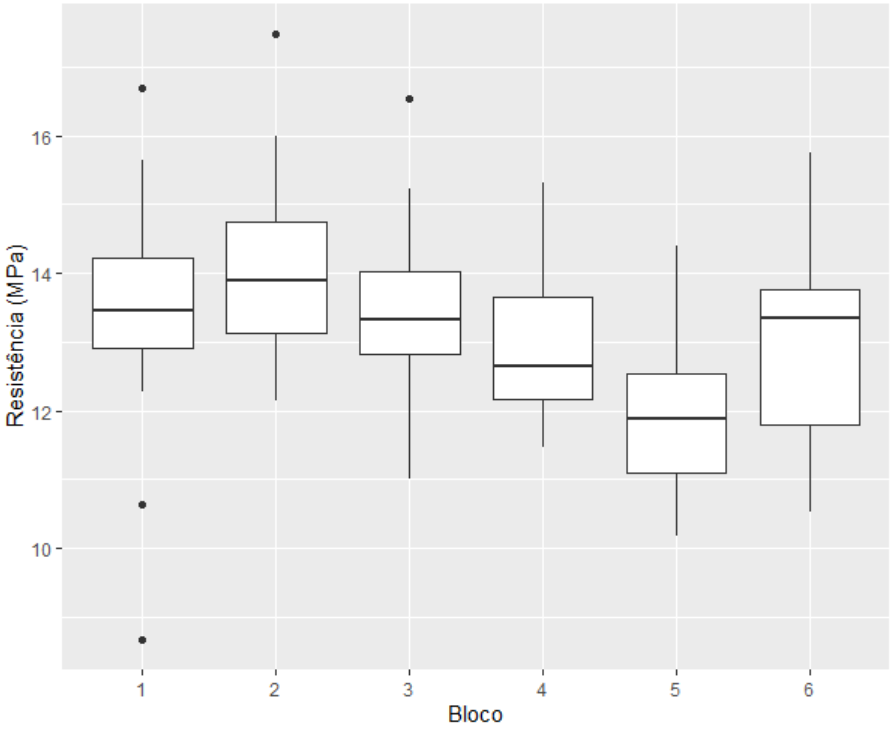


Figura 35 – *Boxplot* da resistência ao cisalhamento dos corpos de prova de acordo com o bloco.

Fonte: Autora, 2025.

A superfície de respostas entre consumo de adesivo e pressão de colagem é ilustrada na Figura 36 por meio da superfície de resposta. Embora o consumo de adesivo não tenha sido significativo estatisticamente para o valor de resistência, percebe-se que com o aumento do consumo a resistência também aumenta levemente.

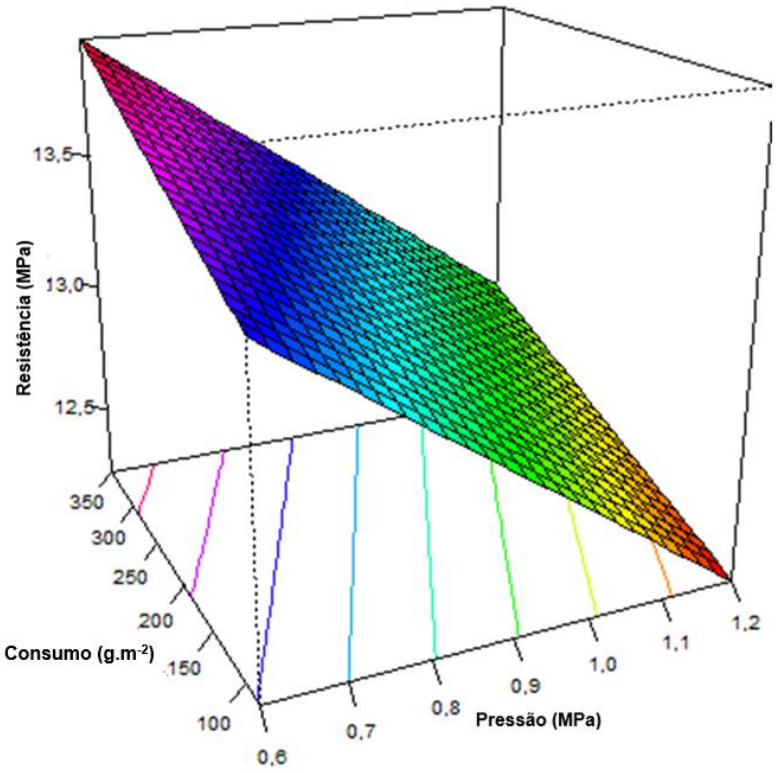


Figura 36 - Superfície de resposta para resistência de acordo com a variação da combinação de consumo e pressão.

Fonte: Autora, 2025.

Segundo Matos *et al.* (2019), espécies de pinus apresentam grande permeabilidade e, por consequência, há maior penetração de adesivo na medida em que se aplica maior pressão, resultando em uma linha de cola dita faminta, o que pode explicar o decréscimo de resistência com o aumento da pressão. Tomé *et al.* (2023), utilizando adesivo poliuretano monocomponente e madeira de *Pinus* sp., também constataram decréscimo de resistência com o aumento da pressão de colagem. Além disso, Frihart e Hunt (2021), citam que para adesivos epóxis uma pequena pressão já é o suficiente para garantir uma boa adesão entre o adesivo e a madeira.

Quanto ao consumo, a partir dos resultados constatou-se que esta variável não foi significativa para a resistência. Porém, notou-se que com o aumento do consumo de adesivo as resistências médias também aumentaram. Bianche *et al.* (2017), comentam que uma maior quantidade de adesivo por área beneficia a fluidez, a transferência, o umedecimento e a penetração do mesmo na madeira. Ainda, esses autores ressaltam que uma quantidade insuficiente de adesivo na linha de cola pode

gerar uma linha de cola faminta. Neste sentido, o consumo de 80 g.m^{-2}, parece não recomendável para este adesivo e, ainda, a referência de 150 g.m^{-2}, surge como um valor mínimo a ser usado. Além dessa gramatura ser uma opção mais econômica entre as estudadas, gramaturas acima de 150 g.m^{-2}, não aumentam significativamente a resistência ao cisalhamento do plano colado.

A ASTM D 2559 (2016), recomenda, para a fabricação de peças estruturais, a utilização de adesivos que permitam obter, em média, pelo menos 90% da resistência ao cisalhamento da madeira sólida. Considerando que a resistência ao cisalhamento deste lote de madeira foi de 12,17 MPa, resistências superiores à 10,95 MPa atenderiam a exigência dessa norma. Desta forma, todos os tratamentos estudados apresentam, em média, desempenho mecânico adequado para a utilização em elementos estruturais em MLC.

Embora as resistências médias obtidas tenham sido superiores à resistência ao cisalhamento da madeira sólida em 22 dos 24 tratamentos, nenhuma atingiu a resistência de 17,6 MPa, conforme especificado pelo fabricante do adesivo. Acredita-se que essa diferença ocorreu devido ao material utilizado, uma vez que nesta pesquisa empregou-se a madeira, enquanto a ASTM D 1002 (2019), emprega elementos de aço. Dessa forma, a falha provavelmente ocorreu na madeira, justificando os valores próximos aos da resistência ao cisalhamento da madeira sólida.

Essa justificativa é coerente com os resultados obtidos por Possa *et al.* (2024), que avaliaram a resistência ao cisalhamento de elementos colados de madeira e aço com o adesivo epóxi Araldite, conforme a ASTM D 905 (2013). Os autores verificaram que a resistência média para os elementos colados de aço (13,49 MPa) foi superior à resistência dos elementos mistos de aço e madeira (9,25 MPa) e, também, aos elementos colados de madeira (12,41 MPa). Embora tenham obtido um coeficiente de variação de 41,6%, para os elementos colados de aço, os resultados confirmam que a resistência ao cisalhamento no plano de colagem tende a ser maior em elementos em aço em comparação à madeira ou à combinações dos dois materiais.

Bianche *et al.* (2017), ao estudar a resistência ao cisalhamento de juntas coladas de *Eucalyptus* sp. e seis adesivos distintos para três gramaturas de adesivo e pressão de 1,2 MPa, também constataram aumento da resistência com o acréscimo de consumo para o adesivo de fenol-formaldeído e para o adesivo de mamona. Os autores encontraram resistências variando de 3,19 a 8,8 Mpa, e constataram que não houve diferença significativa entre os resultados de resistência média para cinco

adesivos, com exceção do adesivo de silicato que apresentou resistência média menor que os outros utilizados. Embora tenha se utilizado nesta pesquisa outra espécie de madeira, os resultados de resistência obtidos foram superiores ao de Bianche *et al.* (2017), para todos os tratamentos, ressaltando a alta resistência apresentada pelo adesivo à base de resina epóxi.

Tomé *et al.* (2023), trabalhando com adesivo poliuretano monocomponente e *Pinus* sp., estudaram o desempenho ao cisalhamento para consumos de adesivo de 150, 200 e 250 $g.m^{-2}$, e para pressões de 0,7 e 1,0 MPa. Os autores constataram resistências variando entre 13,04 a 13,75 MPa, não havendo diferença significativa entre os consumos e pressões utilizados. Porém, os valores médios obtidos pelos pesquisadores foram muito próximos da média geral deste estudo (13,09 MPa). Ainda, corroborando como uma tendência observada, as resistências ao cisalhamento para a pressão de 0,7 MPa foram superiores à de 1,0 MPa.

Nesta pesquisa foi possível observar, que para pressões maiores a resistência ao cisalhamento da linha de cola diminuía. Embora, a pressão de 0,6 MPa apresentou desempenho mecânico adequado, a pressão de 0,8 MPa exibiu coeficientes de variação menores. Outro ponto importante é que a ABNT NBR 7190:2022-1, indica uma pressão mínima de 0,7 MPa, para espécies de madeira com densidade inferior ou igual a 0,5 $g.cm^{-3}$. Assim, orienta-se uma futura avaliação acerca da pressão de 0,7 MPa utilizando o adesivo à base de resina epóxi. Em relação ao consumo, recomenda-se aplicar pelo menos 150 $g.m^{-2}$, de adesivo para facilitar a execução de elementos colados, além de ser uma opção mais econômica.

3.4 CONCLUSÃO

De modo geral, os resultados obtidos evidenciaram que o adesivo epóxi Araldite é uma alternativa viável para a execução de estruturas de madeira, uma vez que todas as combinações de pressão de colagem e consumo de adesivo atenderam às exigências da norma ASTM D 2559 (2016).

A pressão de colagem apresentou efeito significativo sobre a resistência ao cisalhamento das juntas coladas, sendo observada uma redução da resistência com o aumento da pressão. Isto sugere que pressões excessivas podem comprometer a integridade do plano colado.

Por outro lado, o consumo de adesivo não apresentou efeito significativo sobre a resistência ao cisalhamento, indicando que gramaturas maiores não resultam em melhorias expressivas no desempenho mecânico da junta colada. Porém, considerando esta pesquisa, o consumo mínimo de 150 $g.m^{-2}$, apresentou uma melhor trabalhabilidade e representa uma opção mais econômica entre as gramaturas estudadas.

O modelo de regressão linear ajustado para estimar a resistência ao cisalhamento das juntas coladas apresentou um baixo coeficiente de determinação (R^2) e, por isso, não se recomenda a sua utilização neste caso.

Considerando as condições em que esta pesquisa foi desenvolvida, recomenda-se a realização de novos estudos utilizando outras espécies de madeira, especialmente, aquelas de florestas plantadas e, com o adesivo à base de resina epóxi. Além disso, sugere-se a realização de pesquisas similares com o emprego de outros adesivos e pesquisas com o adesivo epóxi para condições ambientais adversas (umidade, temperatura etc.), visando avaliar a durabilidade das juntas coladas.

4 CAPÍTULO IV. COLUNAS EM MADEIRA LAMELADA COLADA COM REFORÇOS EM AÇO

POSSA, Desirè Coraça; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2025. **Colunas em madeira lamelada colada com reforços em aço.** Professor orientador Dr. Alfredo Petrauski. Professor coorientador Dr. Mateus Couri Petrauski.

RESUMO

A procura por construções sustentáveis tem incentivado o uso de materiais renováveis, sendo a madeira uma alternativa. A Madeira Lamelada Colada (MLC) é um método construtivo no qual o material estrutural é fabricado pela união de lamelas de madeira fixadas por meio de adesivo sob pressão. Além dos elementos em MLC, o uso de estruturas mistas de madeira e aço tem se destacado em diversas aplicações estruturais devido à união das características de ambos os materiais. Desta forma, este trabalho consistiu em confeccionar e avaliar o desempenho estrutural, na flexão e na compressão, de colunas em MLC de *Pinus* sp. com adesivo à base de resina epóxi e com reforços laterais em aço comparativamente a colunas sem os reforços. O consumo de adesivo foi de 200 $g.m^{-2}$, para faces de colagem de madeira com aço e 250 $g.m^{-2}$, para as faces de madeira com madeira. A pressão de colagem foi de 0,7 MPa. As colunas com reforço em aço tiveram desempenho mecânico superior às colunas em MLC. Ao avaliar as estruturas quanto ao esforço de flexão, as estruturas em Madeira Lamelada Colada Armada (MLCA), foram 5,1 vezes mais rígidas que as estruturas em MLC, superando a estimativa teórica. Quanto ao ensaio na compressão, todos as colunas manifestaram perda da estabilidade lateral para tensões inferiores à resistência da madeira à compressão. Em relação à resistência, as estruturas com o reforço em aço foram 93% mais resistentes. Em relação à rigidez das estruturas sob o esforço de compressão, as estruturas com reforço em aço não apresentaram maior rigidez, exceto para as unidades de baixa densidade. Porém, as colunas mistas de aço e madeira conseguiram atingir maiores níveis de força de compressão.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas de madeira, Estruturas mistas, Flambagem.

POSSA, Desirè Coraça; State University of West Paraná, February 2025**. Glued laminated timber columns with steel reinforcements**. Advising Professor Dr. Alfredo Petrauski. Co-advising Professor Dr. Mateus Couri Petrauski.

ABSTRACT

The increasing demand for sustainable construction has driven the adoption of renewable materials, with wood becoming a key alternative. Glued laminated timber (Glulam) is a construction technique in which wood laminates are bonded using adhesive and pressure to form structural elements. Beyond Glulam, composite wood-steel structures have gained attention in various structural applications, leveraging the combined benefits of both materials. This research focused on fabricating and evaluating the structural performance—under bending and compression—of Glulam columns made from *Pinus* sp., bonded with epoxy-based adhesive and reinforced with lateral steel plates, in comparison to columns without reinforcement. The adhesive was applied at 200 $g.m^{-2}$ for wood-to-steel interfaces and 250 $g.m^{-2}$ for wood-to-wood interfaces, with a bonding pressure of 0.7 MPa. The columns reinforced with steel demonstrated enhanced mechanical performance over those without reinforcement. In bending tests, the composite Glulam-steel structures were 5.1 times stiffer than the pure Glulam columns, exceeding theoretical predictions. During compression tests, all columns experienced lateral instability at stresses below the wood's compressive strength. The composite steel-reinforced structures were 93% stronger in terms of load-bearing capacity. While the steel reinforcement did not improve stiffness under compression, except in low-density specimens, the composite columns were able to support significantly higher compressive loads.

KEYWORDS: Wood structures, Composite structures, Buckling.

4.1 INTRODUÇÃO

A procura por construções sustentáveis tem incentivado o uso de materiais renováveis, sendo a madeira uma alternativa que favorece o desenvolvimento do setor madeireiro na construção civil. No Brasil, a ampla disponibilidade de madeira de reflorestamento representa um grande potencial para a expansão dos sistemas construtivos em madeira (Gomes, 2018).

A madeira, historicamente é um dos materiais mais utilizados em diversas etapas da construção civil. Quando proveniente de florestas plantadas, ela contribui para o desenvolvimento sustentável do setor, ao reduzir o impacto ambiental negativo de uma edificação (Souza, 2010; Cury e Filho, 2011).

Em comparação a outros materiais de construção, a madeira requer baixa quantidade de energia para seu processamento, contribui para a redução do efeito estufa e possui excelentes propriedades de isolamento térmico e elétrico. Além disso, o uso da madeira em edificações ajuda a mitigar as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que o dióxido de carbono absorvido durante o crescimento da árvore implica, no aprisionamento do carbono na madeira e a devolução do oxigênio para a atmosfera (Souza e Demenighi, 2017; Shigue, 2018).

No sul do Brasil, o reflorestamento com o gênero Pinus proporciona desenvolvimento social e econômico em extensão regional e tem expressiva participação na economia nacional, demonstrando ser uma atividade economicamente viável, ambientalmente correta e com impacto social positivo (Vasques *et al.*, 2007; Shimizu, 2008).

O uso extensivo da madeira ao longo dos anos desempenhou um papel fundamental na evolução das técnicas de manuseio e, no desenvolvimento de abrigos e estruturas que hoje integram as cidades, este avanço impulsionou o surgimento de novos métodos construtivos (Cordeiro Jr. *et al.*, 2017).

Entre os métodos construtivos de madeira, a Madeira Lamelada Colada (MLC) se destaca, onde o material estrutural é fabricado pela junção de lamelas de madeira selecionadas, alinhadas com as fibras paralelas e fixadas por meio de adesivo sob pressão (Pfeil e Pfeil, 2003). Uma das principais vantagens da MLC é a possibilidade de unir peças de pequenas dimensões, permitindo um melhor aproveitamento para a construção de elementos estruturais (Trianoski *et al.*, 2020; Segundinho *et al.*, 2021).

Além dos elementos em MLC, o uso de estruturas mistas de madeira e aço tem se destacado em diversas aplicações estruturais devido à união das características de ambos os materiais (Possa *et al.*, 2024). Ainda, Pigozzo *et al.* (2023), destacam que os adesivos epóxis são os mais indicados para a colagem de reforços ou elementos de aço em peças de madeira.

Diversos estudos foram realizados para aprimorar a capacidade de suporte de estruturas de madeira existentes por meio do reforço com materiais metálicos. Wang *et al.* (2021), estudaram vigas em MLC, com madeira de rápido crescimento reforçada com chapas de aço e constataram um aumento na rigidez de até 92%, em comparação às vigas sem o reforço. Yang *et al.* (2017), utilizaram adesivo para colar chapas de aço para reforçar vigas de MLC, observando um acréscimo de até 90% na capacidade de carga na flexão. De Luca e Marano (2012), em ensaios de flexão com vigas de MLC reforçadas com barras de aço, constataram um aumento de 48,1%, na capacidade de carga e de 43,8% na ductilidade.

Os estudos demonstram o potencial do reforço de estruturas de MLC, com materiais metálicos para aumentar significativamente a capacidade de suporte dessas estruturas. Desta forma, este estudo teve como objetivo confeccionar e avaliar o desempenho estrutural, na flexão e na compressão, de colunas em MLC de *Pinus* sp. com reforços laterais em aço comparativamente às colunas sem os reforços.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia – LEME e no Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira – LATEM ambos pertencentes à infra-estrutura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, no *campus* de Cascavel-PR.

Os materiais utilizados foram a madeira de *Pinus* sp., o adesivo à base de resina epóxi e as chapas de aço. A madeira foi adquirida no comércio local, sendo o lote composto por 120 tábuas com seção transversal de 15 cm × 2,5 cm, e comprimento de três metros. O lote de madeira ficou estocado até atingir o equilíbrio higroscópico com o meio, com um teor de umidade de aproximadamente 12%. As chapas de aço SAE 1020 foram adquiridas em comércio local com espessura de 1,5 mm, e dimensões do plano conforme o comprimento e largura das lamelas de

madeira. O adesivo, por sua vez, é bicomponente, com o nome comercial Araldite Profissional e é produzido pela empresa Tekbond®. Segundo o fabricante, a proporção de mistura, em massa, de resina e endurecedor é de 1,0:0,8.

Em todo o processo de colagem, o adesivo foi misturado por um período de 2 minutos, aplicado em apenas uma das superfícies a serem coladas e espalhado com o auxílio de uma espátula metálica. Para as superfícies de colagem de madeira com madeira utilizou-se a gramatura de 250 $g.m^{-2}$, e para as superfícies de madeira com aço a gramatura foi de 200 $g.m^{-2}$. A pressão de colagem foi de 0,7 MPa, sendo aplicada empregando-se uma prensa manual com parafusos de rosca infinita e aferida por meio da correlação entre aperto de porca com força axial aplicada. O aperto de porca foi aferido utilizando-se um torquímetro digital da marca Wisretec. Após um período de 30 minutos da primeira prensagem, foram conferidos os apertos de porca, reaplicando-os quando necessário.

4.2.1. Classificação visual e densidade aparente da madeira

As peças de *Pinus* sp. foram estocadas no LATEM em janeiro de 2024, onde ficaram protegidas de intempéries e dispostas com espaçamento entre as camadas para possibilitar a circulação do ar de secagem até o equilíbrio higroscópico com o meio.

Iniciou-se o processamento das peças de madeira após elas atingirem a umidade de equilíbrio com o meio. Primeiramente foi padronizada a espessura de todas as peças em aproximadamente 23 mm. Em seguida, as peças foram divididas em tamanhos menores, de acordo com a necessidade da pesquisa.

Com as superfícies das peças limpas e processadas, realizou-se uma inspeção visual com o intuito de identificar e quantificar os defeitos, como nós, rachaduras, presença de madeira de medula e empenamentos, conforme as recomendações da ABNT NBR 7190:2022-2. Além da classificação visual, determinou-se a densidade aparente de cada peça com o objetivo de conhecer a variabilidade apresentada pelo lote.

4.2.2 Caracterização da madeira

Para determinar as propriedades mecânicas da madeira, foi feita a sua caracterização seguindo as recomendações da ABNT NBR 7190:2022-3. Como as colunas foram idealizadas para avaliar seu desempenho mecânico sob esforço de compressão, realizou-se ensaios para determinar a resistência à compressão paralela às fibras, e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do lote de madeira.

A ABNT NBR 7190:2022-3, aconselha o ensaio de, no mínimo, 6 corpos de prova para caracterizar de forma simplificada a resistência de espécies pouco conhecidas. Porém, neste caso, para a caracterização da madeira de *Pinus* sp. foram confeccionados nove corpos de prova para obter a resistência à compressão paralela às fibras, e oito para o módulo de elasticidade.

A ABNT NBR 7190:2022-3, prescreve que os corpos de prova devem ter a seção transversal de 5 cm x 5 cm. Como as lamelas apresentavam espessuras em torno de 2 cm, foram coladas três lamelas de madeira com densidades próximas para que os corpos de prova atingissem as dimensões especificadas.

Foi verificada a densidade aparente dos corpos de prova, selecionando peças que melhor representassem a variabilidade de densidade do lote de madeira. O processo de colagem foi feito em ambiente que possibilitou o controle da temperatura em 21°C, e as lamelas de madeira apresentavam umidade média de 13,56 ± 0,57%. O processamento final dos corpos de prova, com o intuito de se obter dimensões normativas padronizadas foi realizado após o período de cura do adesivo que, segundo o fabricante é de 24 horas.

Ainda, conforme prescreve a ABNT NBT 7190:2022-3, foi feita a correção das propriedades de resistência e de rigidez da madeira encontradas para a umidade padrão de 12%.

4.2.3 Colunas em madeira lamelada colada com reforços em aço

Inicialmente, desejou-se verificar se a adição de chapas de aço em colunas de madeira aumentaria a sua resistência e a sua rigidez. Para isso, idealizou-se a comparação de desempenho de pares de colunas com densidade aparente similares

sendo que uma receberia reforços laterais em aço e a outra não seria reforçada. Desta forma, foram feitas colunas em Madeira Lamelada Colada (MLC), e em Madeira Lamelada Colada Armada (MLCA).

Ainda, as colunas foram projetadas considerando o índice de esbeltez máximo admitido pela ABNT NBR 7190:2022-1, sendo este igual a 140. A Figura 37, ilustra a seção transversal adotada para as colunas, sendo que as colunas em MLC eram formadas pela colagem de três lamelas de 1,5 x 6 cm², e as colunas em MLCA apresentavam a mesma seção em madeira e recebiam duas chapas de aço nas laterais com espessura de 1,5 mm, e com a mesma largura das lamelas de madeira.

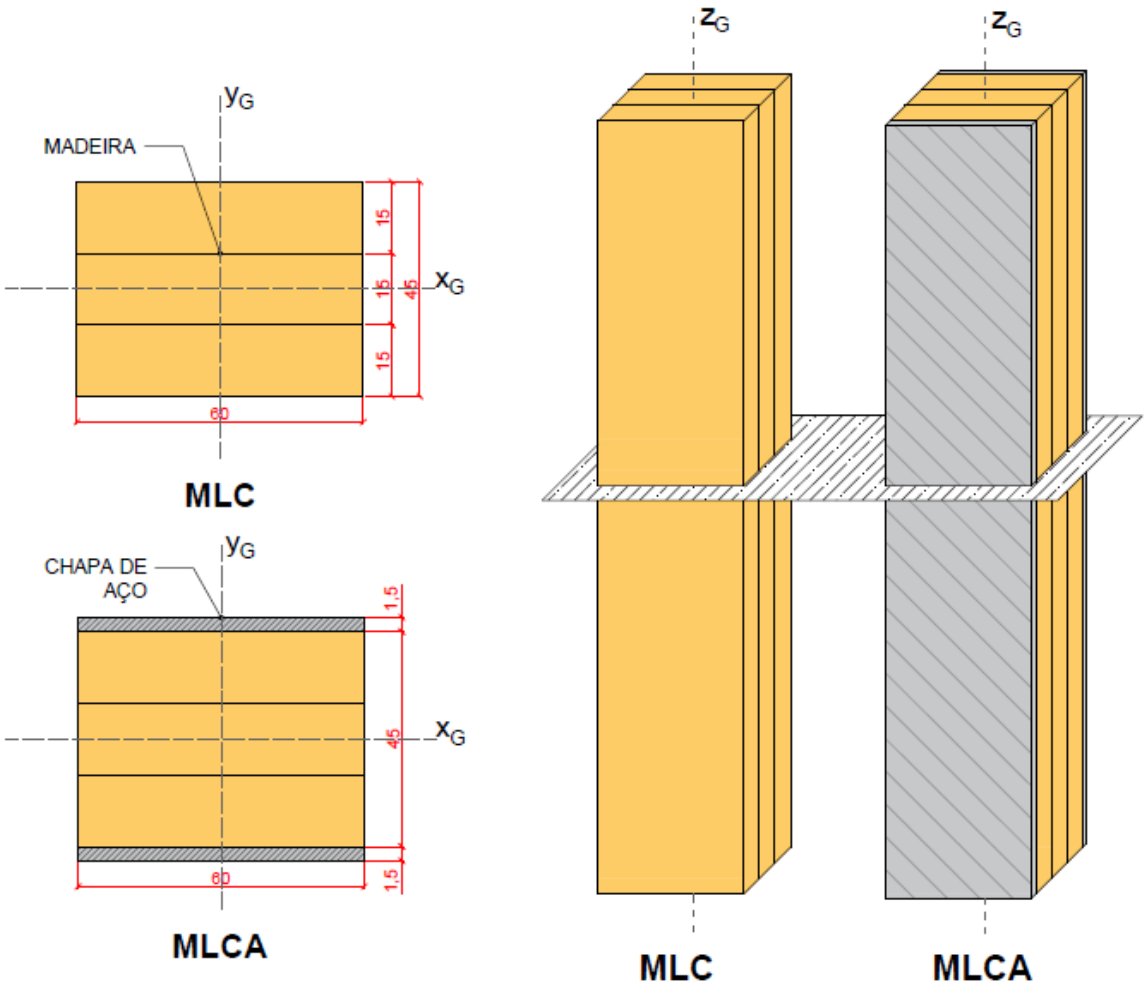


Figura 37 - Seção transversal das colunas em MLC e MLCA, dimensões em mm.

Fonte: Autora, 2025.

Nesta pesquisa, quanto ao comprimento teórico de flambagem (L_0), foi considerado que, na direção de interesse, flambagem em torno do eixo “x”, as vinculações da coluna seriam apoios de segundo gênero ($L_0 = L$). Desta forma, as colunas apresentaram o comprimento de flambagem igual a 182 cm.

Ainda, foram realizadas repetições considerando a classe de densidade aparente da madeira, sendo elas baixa, média e alta. Para facilitar o entendimento das diferentes colunas confeccionadas, na Tabela 16 são apresentadas as características e nomenclaturas adotadas para cada elemento estrutural.

Tabela 16 – Nomenclatura das colunas confeccionadas

Nomenclatura	**Densidade**	**d (g.cm^{-3})**	$\boldsymbol{\lambda}$	$\boldsymbol{\lambda_{rel}}$	**Reforço em aço**
B-MLC	Baixa	0,531	140,1	3,04	Não
B-MLCA	Baixa	0,528	95,3	2,06	Sim
M-MLC	Média	0,596	140,1	3,04	Não
M-MLCA	Média	0,593	95,3	2,06	Sim
A-MLC	Alta	0,777	140,1	3,04	Não
A-MLCA	Alta	0,788	95,3	2,06	Sim

Fonte: Autora, 2025.

Considerado o interesse da pesquisa, adotou-se para as unidades sem reforço (MLC), o índice de esbeltez máximo permitido pela ABNT NBR 7190:2022-1. Para as unidades com reforço, os valores ficam modificados, haja vista, a consideração do momento de inércia homogeneizado da seção mista, conforme será explicado com maiores detalhes na seção 4.3.3.

Para a análise das colunas em MLCA considerou-se a seção transversal teórica, onde os dois materiais trabalhariam de forma solidária, transformando a chapa de aço em uma seção equivalente em madeira. Tal suposição é utilizada por Hibbeler (2009), e Popov (1984), para o estudo, por exemplo, de vigas com dois materiais distintos.

Ainda, as colunas foram verificadas conforme as orientações da ABNT NBR 7190:2022-1, quanto a estabilidade de peças comprimidas para se obter valores de carregamentos que poderiam ocorrer a instabilidade das estruturas. Frente aos valores encontrados na caracterização da madeira, assumiu-se os valores de resistência média do lote para realizar as verificações da coluna.

4.2.4 Confecção das colunas

As peças de madeira foram processadas para obter-se lamelas com dimensões próximas às estabelecidas na Figura 35. No dia da colagem, realizou-se o processamento das lamelas para se obter as dimensões finais. Após esse processamento, as peças foram limpas com o auxílio de ar comprimido e trincha.

Com a madeira processada, realizou-se também a limpeza da superfície das chapas de aço que iriam receber adesivo. Para isso, foram utilizadas lixas com granulometria de 100, 200 e 300. Após o processo de lixamento, a superfície foi limpa com álcool 90%, para eliminar substâncias prejudiciais e pó, visando um bom resultado na colagem. Na Figura 38 é possível observar a superfície das chapas de aço antes e após o processo de limpeza. A Figura 38, ainda, ilustra furos executados nas lâminas de aço. Tais furos foram feitos para instalação de pequenos parafusos visando evitar, durante o ensaio de compressão, um eventual descolamento das chapas, especialmente quando houvesse grandes deslocamentos horizontais. Isto foi feito motivado pelo descolamento exibido na pesquisa de Ribeiro (2024). Neste trabalho, por hipótese, admitiu-se trabalho solidário entre a madeira e as chapas de aço, garantido por meio do adesivo. Desta forma, os pequenos parafusos foram uma precaução contra o descolamento na direção perpendicular ao plano colado, podendo colaborar no trabalho solidário.

Figura 38 – Superfície da chapa de aço antes (A) e após (B) o processo de limpeza.

Fonte: Autora, 2025.

Foram utilizados dois gabaritos de colagem para a confecção das colunas, tendo sido possível confeccionar quatro colunas por dia de colagem. Os conjuntos de barras rosqueadas para aplicar a pressão foram calibrados previamente com o auxílio de uma célula de carga e um torquímetro eletrônico. Após a calibração, foi feita a regressão linear para se obter a equação para estimar o torque necessário para atender à pressão estabelecida. Os gráficos de torque × força para cada uma das prensas são apresentados na Figura 39, assim como a equação de regressão linear para cada conjunto.

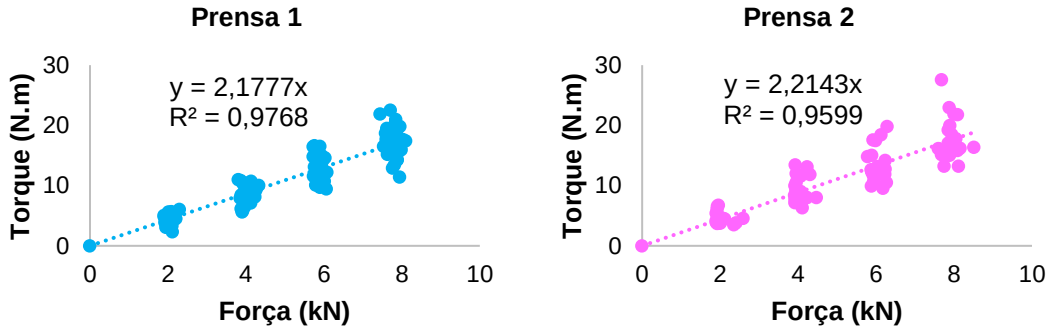


Figura 39 – Gráfico torque × força para as prensas calibradas.

Fonte: Autora, 2025.

Durante a colagem o tempo em aberto foi nulo e o tempo em fechado foi de 30 minutos. O processo de colagem de duas colunas durou em média 23 min. As lamelas de madeira das colunas foram coladas com umidade média de 14,13 ± 1,11% em ambiente que possibilitou o controle da temperatura em 23,2° ± 1,37°C. As colunas ficaram sob pressão por um período mínimo de 4 horas. Na Figura 40 é possível verificar algumas etapas do processo de colagem para a confecção das colunas.

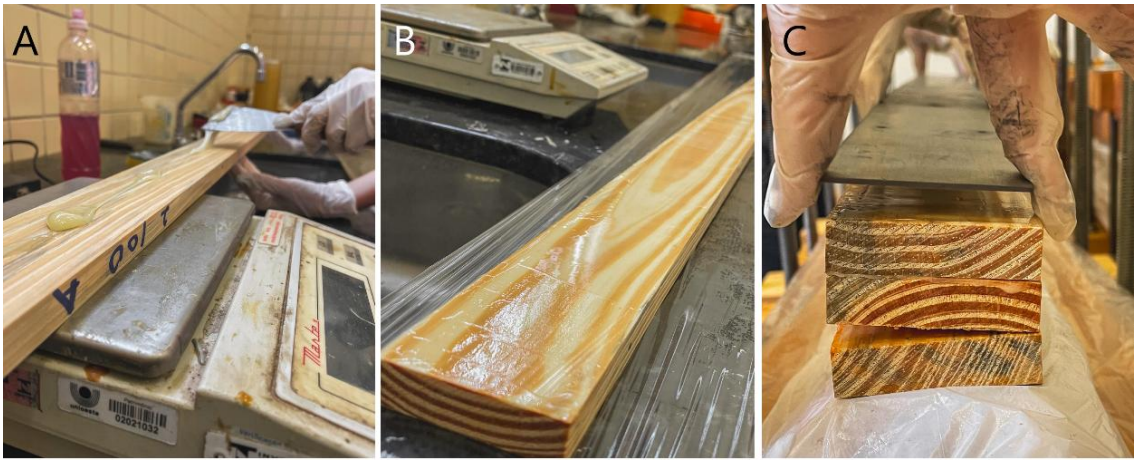


Figura 40 – Confecção das colunas: (A) pesagem e aplicação do adesivo no plano colado; (B) adesivo espalhado sobre a superfície da madeira; e (C) montagem da coluna em MLC com reforço em aço.

Fonte: Autora, 2025.

As colunas que receberam os reforços de aço foram sorteadas, de modo a evitar favorecimento. No total, foram confeccionadas seis colunas com seção retangular, sendo metade em MLC, e a outra metade em MLCA. Após o período de cura do adesivo, conforme indica o fabricante, as colunas foram preparadas para a realização dos ensaios.

4.2.5 Ensaio não destrutivo das colunas à flexão

As colunas foram ensaiadas à flexão na laje de reação disponível no LEME. Foi realizado o ensaio de flexão a 4 pontos. Para a aplicação do carregamento foram utilizados dois cilindros hidráulicos que foram fixados na laje de reação nos locais indicados na Figura 41. Entre os cilindros hidráulicos e a estrutura foram instaladas duas células de carga para verificar a força aplicada. Para os apoios das colunas, utilizou-se aparatos que funcionam, no plano da estrutura, como um apoio de primeiro gênero, impedindo o deslocamento vertical, e um apoio de segundo gênero, impedindo deslocamentos na vertical e horizontal. Na Figura 41, além dos equipamentos supracitados, são indicados também as posições dos transdutores de deslocamento empregados (tipo relógio comparador).

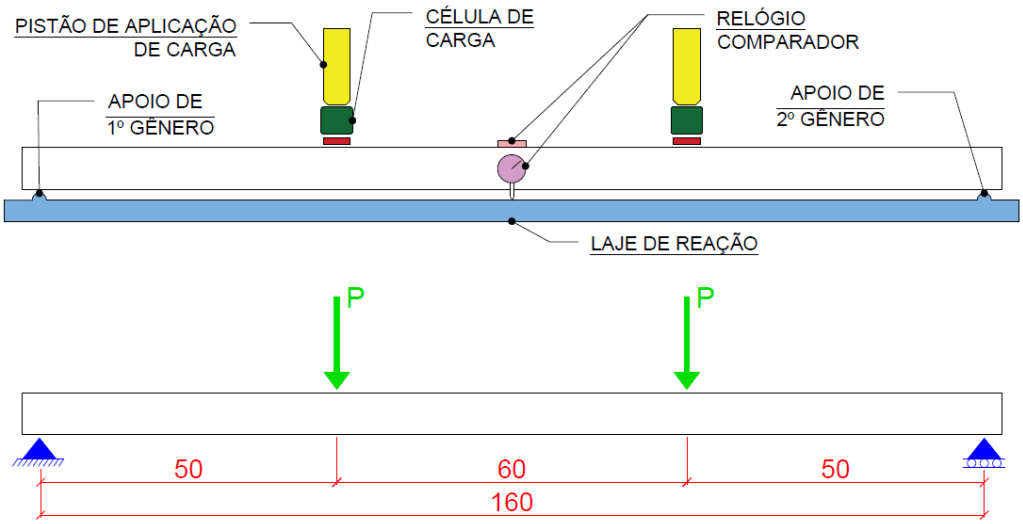


Figura 41 – Disposição dos aparatos para o ensaio à flexão das colunas, dimensões em cm.

Fonte: Autora, 2025.

Para a leitura dos deslocamentos, foi instalado um relógio comparador no ponto médio do vão da estrutura, com resolução de 0,01 mm. Ainda, foi instalado outro relógio comparador, com resolução de 0,001 mm, no ponto médio do vão para avaliar a evolução das deformações de encurtamento na estrutura conforme o acréscimo de carregamento.

Após a instalação dos aparatos, deu-se início ao ensaio. Primeiramente aplicou-se uma força de acomodação de aproximadamente 1 kN. Em seguida, a estrutura foi descarregada e os relógios zerados. O ensaio foi conduzido conforme as seguintes etapas:

I. Aplicação do carregamento até 2,4 kN, com registro das leituras dos relógios comparadores a cada 0,8 kN, e descarregamento da carga;
II. Inversão de lado da estrutura e do relógio comparador;
III. Repetição da etapa I, para flexão com a seção rotacionada.

Para o cálculo das tensões atuantes, por meio do relógio com resolução de 0,001 mm, utilizou-se a Equação 23, que compreende a chamada Lei de Hooke. Esta lei admite que um aumento na tensão provoca um aumento proporcional na

deformação do material (Hibbeler, 2009). Tais tensões serão chamadas neste trabalho de tensões experimentais.

$$\sigma = \varepsilon . E \tag{23}$$

Em que: σ é a tensão normal atuante; ε é a deformação específica normal. mensurada com auxílio do relógio comparador, e E é o módulo de elasticidade do material.

Para estimar a tensão normal máxima teórica atuante na estrutura à flexão (σ_M), aplicou-se a Equação 24, para cada nível de força. Esta equação admite que a tensão máxima ocorre no ponto da área da seção transversal mais afastado do eixo neutro (Hibbeler, 2010).

$$\sigma_M = \frac{Mc}{I} \tag{24}$$

Em que: M é o momento interno resultante, c é a distância perpendicular do eixo neutro até o ponto mais afastado do eixo neutro e I é o momento de inércia da área da seção transversal.

Após análise dos dados esperava-se que as tensões ditas experimentais (equação 23), retornassem valores próximos das tensões teóricas (equação 24).

4.2.6 Ensaio destrutivo das colunas à compressão

As colunas foram ensaiadas à compressão utilizando-se um quadro de reações em aço disponível no LEME. Utilizou-se alguns aparatos para a realização do ensaio, conforme é apresentado na Figura 42.

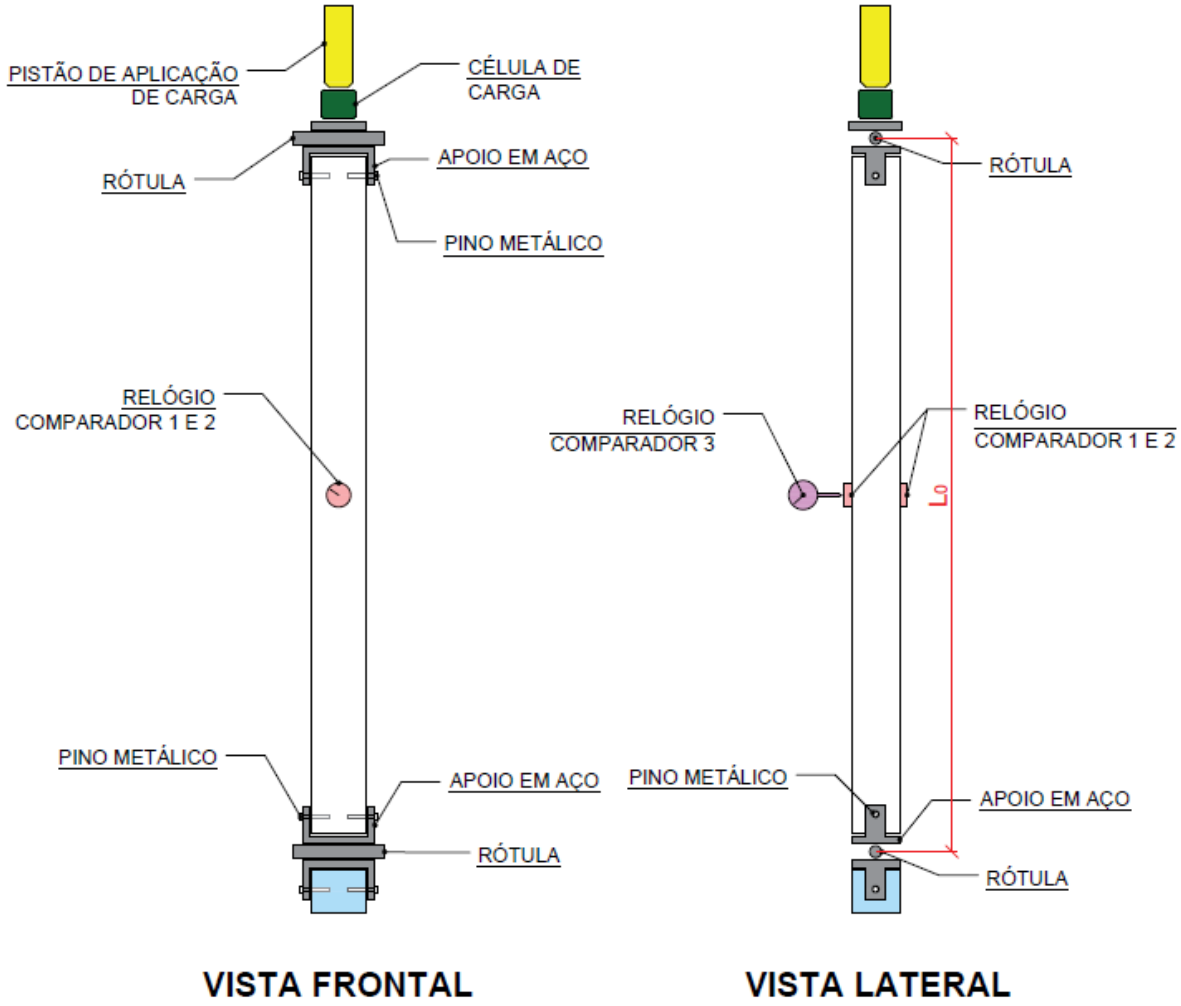


Figura 42 – Disposição dos aparatos para o ensaio à compressão das colunas.

Fonte: Autora, 2025.

Para a aplicação de força, utilizou-se um cilindro hidráulico que foi fixado no quadro de reação. Em relação à aquisição de força aplicada, instalou-se uma célula de carga abaixo do cilindro hidráulico, com capacidade de 200 kN. Foi feito um sistema de contraventamento para impedir o deslocamento da coluna na direção de seu eixo *x* (flexão em torno do eixo *y*). Os deslocamentos horizontais na direção do eixo *y* (flexão em torno do eixo *x*), não foram impedidos. Estes últimos deslocamentos foram mensurados utilizando-se um transdutor posicionado na meia altura da coluna. Na marcha de incrementos de forças, adotou-se leituras a cada 4 kN. Para o apoio das colunas foram utilizados aparatos que funcionaram como apoios de segundo gênero (Figura 43-C), e este sistema foi fixado nas extremidades das colunas.

Para garantir, ao máximo possível, que a coluna estivesse nivelada e com a aplicação da força centralizada em relação ao eixo longitudinal da coluna, utilizou-se um nível a laser para a instalação das colunas no quadro de reação, conforme ilustra-se nas Figuras 43-A e 43-B.

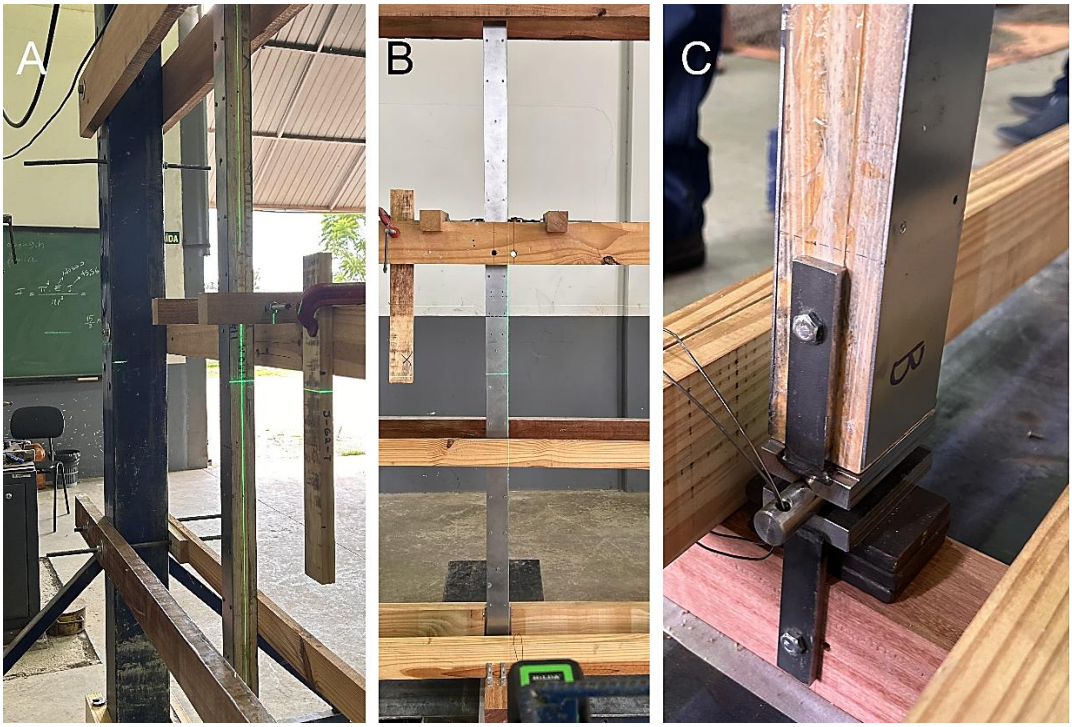


Figura 43 – Utilização do nível a laser para o nivelamento das colunas (A e B) e apoio de segundo gênero instalado nas colunas (C).

Fonte: Autora, 2025.

A leitura dos deslocamentos laterais das colunas foi realizada por meio de um relógio comparador (R3), com resolução de 0,01 mm, sendo instalado à meia altura da coluna. Este relógio foi utilizado na avaliação das excentricidades de aplicação de forças e na evolução das flechas da coluna. Outros dois relógios (R1 e R2), posicionados à meia altura, com resolução de 0,001 mm, permitiram avaliar as deformações das faces opostas das colunas. Tais relógios foram posicionados nas faces que receberam chapas de aço e nas faces equivalentes quando das colunas sem reforço (MLC). Essa instrumentação também permitiu avaliar os níveis de tensões normais (σ) atuantes nas faces externas das unidades sob carregamento.

Após a instalação de todos os aparatos, iniciou-se cada ensaio. Primeiramente aplicava-se uma força para a “acomodação” da estrutura de aproximadamente 5 kN. Em sequência, a estrutura era descarregada e os relógios comparadores eram zerados. O ensaio foi conduzido registrando os deslocamentos medidos nos transdutores e a aplicação do carregamento ocorreu até a manifestação de instabilidade por flexão na compressão na estrutura ensaiada.

Para estimar a variação das tensões de compressão atuantes nas colunas utilizou-se a Equação 23, para obter as tensões experimentais. As tensões teóricas foram calculadas da forma convencional, por meio da simples razão entre a força aplicada e a área da seção transversal, ou seja, usando a Equação 25.

$$\sigma_N = \frac{F}{A} \tag{25}$$

Em que: σ_N é a tensão normal atuante; F é a força de compressão aplicada e A é a área resistente da seção transversal. Ainda, tanto para o cálculo da tensão teórica quanto para a tensão experimental somou-se a parcela referente a tensão de flexão resultante da excentricidade da aplicação da força conforme a Equação 24. Para obter o momento fletor atuante, multiplicou-se a força pelo deslocamento horizontal (R3), mensurado para a coluna.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Densidade aparente da madeira

O lote de madeira de *Pinus* sp. era formado por 120 tábuas com densidade aparente variando entre 0,432 g.cm^{-3}, a 0,826 g.cm^{-3}. A densidade média do lote era igual a 0,627 g.cm^{-3}, com um coeficiente de variação de 14,48%. Nas Figuras 44 e 45 estão apresentados o histograma e o *boxplot* relativo à densidade aparente, respectivamente.

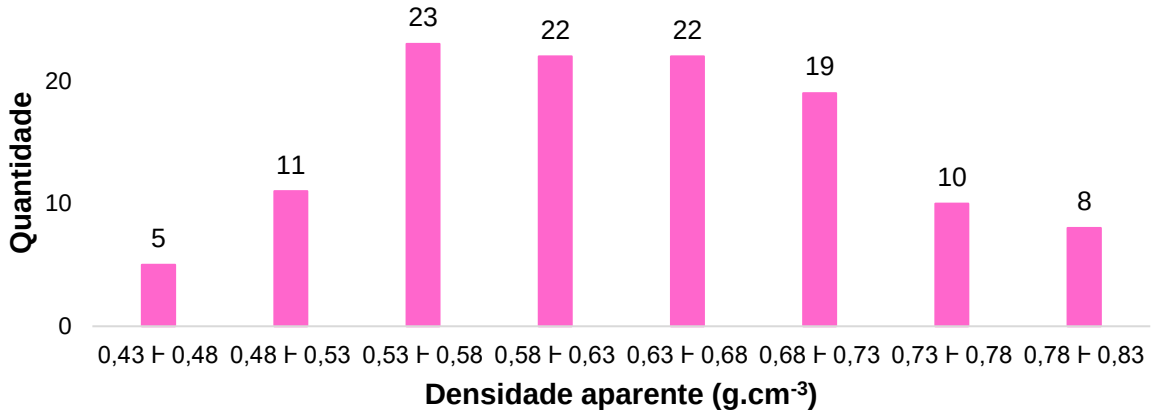


Figura 44 – Histograma da quantidade de tábuas pela densidade aparente do lote.

Fonte: Autora, 2025.

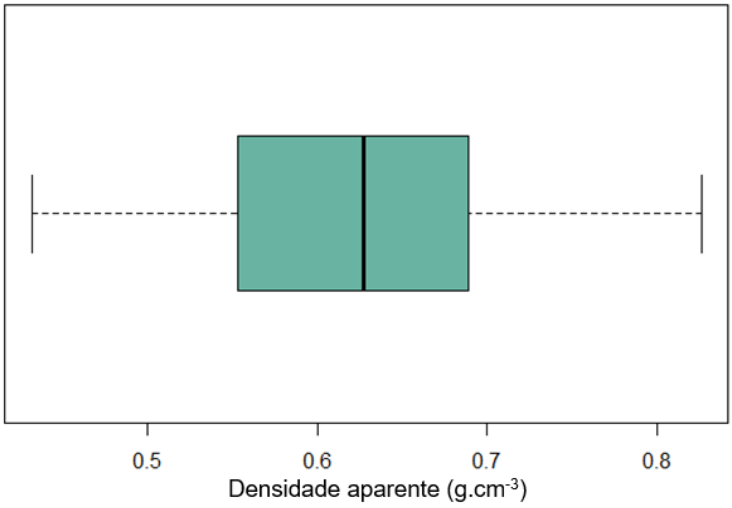


Figura 45 – *Boxplot* da densidade aparente do lote de madeira.

Fonte: Autora, 2025.

De acordo com a distância entre quartis, é possível observar que o lote de madeira não apresentou valores discrepantes de densidade. Ainda, percebeu-se que as tábuas entre o limite inferior e o 1º quartil e as tábuas entre o 3º quartil e o limite superior tiveram uma maior variabilidade. Essas tábuas representam as tábuas com menor e maior densidade aparente, respectivamente. De acordo com a ABNT NBR 7190:2022-2, este lote de madeira se enquadraria na Classe 1, por apresentar uma densidade maior que 0,5 g cm^{-3}, para madeiras da espécie de pinus.

Comparando-se a densidade aparente deste lote com pesquisas que utilizaram a mesma espécie de madeira (Possa, 2021; Tomé, 2022), o coeficiente de variação foi semelhante. No entanto, a amplitude dos valores de densidade foi maior. Os lotes utilizados por Possa (2021), e Tomé (2022), apresentavam densidade média de 0,52 g.cm^{-3} e 0,55 g.cm^{-3}, respectivamente. Além disso, em ambas as pesquisas as densidades máximas não ultrapassaram 0,75 g.cm^{-3}. Nesta pesquisa, cerca de 7% do lote apresentou densidade superior à das pesquisas comparadas.

A partir desses resultados, o lote de madeira foi separado em três grupos conforme suas densidades, sendo:

- Baixa: 30 tábuas com densidade variando entre 0,432 g.cm^{-3} e 0,553 g.cm^{-3};
- Média: 60 tábuas com densidade variando entre 0,554 g.cm^{-3} e 0,688 g.cm^{-3};
- Alta: 30 tábuas com densidade variando entre 0,69 g.cm^{-3} e 0,826 g.cm^{-3}.

4.3.2 Caracterização da madeira

Na Tabela 17 são apresentados os valores obtidos para a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade à compressão. Vale ressaltar que foi verificada a densidade aparente de todos os corpos de prova ensaiados.

Tabela 17 – Resultados da caracterização da madeira de *Pinus* sp.

	Nº de corpos de prova	Densidade aparente média (g.cm^{-3})	Valores médios (MPa)	Valores característicos (MPa)	C.V. (%)
Resistência à compressão paralela as fibras (f_{c0})	9	0,659	55,32	51,33	12,63
Módulo de elasticidade à compressão (E_{c0})	8	0,662	11944	7817	26,94

Fonte: Autora, 2025.

A ABNT NBR 7190:2022-1, admite coeficientes de variação da ordem de 18% para resultados obtidos da aplicação de tensões normais. Nesta caracterização, apenas a resistência à compressão atendeu ao limite estipulado.

Comparando-se com as classes mecânicas estipuladas para espécies de pinus apresentada pela ABNT NBR 7190:2022-2, esta caracterização apresentou módulo de elasticidade médio semelhante ao da norma, que é igual a 11 GPa. Quanto à resistência à compressão paralela às fibras, a norma apresenta um valor característico de 22 MPa. Assim, este lote apresentou uma resistência 2,3 vezes maior que a estipulada pela norma.

Ao confrontar essa caracterização com os valores obtidos por Possa (2021), e Tomé (2022), a resistência à compressão desta pesquisa foi 13% e 37% maior, respectivamente. Quanto ao módulo de elasticidade, o valor obtido foi semelhante ao encontrado por Possa (2021), e cerca de 33% maior que o identificado por Tomé (2022).

4.3.3 Estimativa de força crítica das colunas

Nessa seção são apresentados os cálculos realizados para avaliar as seções transversais das colunas propostas e quantificar a expectativa de acréscimo de resistência e rigidez com a adição das chapas de aço.

Em relação às colunas em MLC, a seção transversal é composta por três lamelas de 1,5 cm x 6 cm, solidarizadas por meio de adesivo. Assim, para o cálculo do momento de inércia em torno do eixo *x*, têm-se:

$$I_{x,MLC} = \frac{(6 \times 4{,}5^3)}{12} \;\therefore\; I_{x,MLC} = 45{,}6\ \text{cm}^4 \tag{26}$$

Já para as colunas em MLCA, sabe-se que cada material tem propriedades distintas, sendo que o aço é mais rígido que a madeira. Desta forma, para analisar a sua seção transversal, transformou-se a seção do aço em uma seção equivalente em madeira, conforme ilustrado na Figura 46.

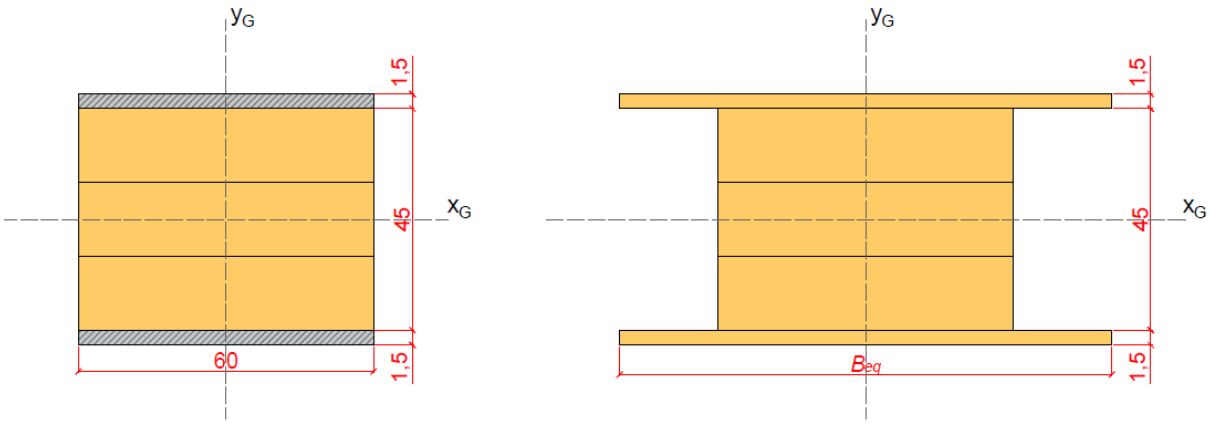


Figura 46 – Seção transversal da coluna em MLCA, à esquerda, e seção transversal equivalente da coluna em MLC, à direita, dimensões em mm.

Fonte: Autora, 2025.

Para quantificar a largura equivalente da chapa de aço transformada em madeira (B_{eq}), admitiu-se a relação entre os módulos de elasticidade dos dois materiais conforme a Equação 27.

$$B_{eq} = b \times \frac{E_{aço}}{E_{madeira}} \therefore B_{eq} = 6{,}0 \times \frac{200\ \text{GPa}}{11{,}94\ \text{GPa}} \therefore B_{eq} = 100{,}5\ \text{cm} \quad (27)$$

Com isso, calculou-se o momento de inércia para rotação em torno do eixo x, para as colunas em MLCA.

$$I_{x,MLCA} = \frac{(100{,}5 \times 4{,}8^3)}{12} - \left[\frac{(100{,}5 - 6) \times 4{,}5^3}{12}\right] \therefore I_{x,MLCA} = 208{,}6\ \text{cm}^4 \quad (28)$$

A partir da relação entre os momentos de inércia têm-se que a inserção das chapas de aço nas colunas em MLC resultou, teoricamente, em colunas 4,6 vezes mais rígidas na direção em que se esperava que ocorresse a instabilidade para a seção de MLC.

Ao calcular as áreas da seção em MLC, e a seção em MLCA, equivalente em madeira obteve-se os valores de 27 cm² e 57,15 cm², respectivamente. Assim, as colunas reforçadas com aço apresentaram uma área equivalente 2,12 vezes maior

que as colunas sem o reforço. Como consequência, sob compressão centrada, tais unidades seriam 2,12 vezes mais resistentes.

Com os valores da caracterização da madeira, e os momentos de inércia foi possível calcular as estimativas da força axial elástica de flambagem de Euler (N_e), e da tensão associada a essa força (σ_e) de acordo com o índice de esbeltez ($\boldsymbol{\lambda}$) para as colunas em MLC e MLCA, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Força crítica e tensão crítica conforme o índice de esbeltez

Colunas sem reforço (MLC)				
λ	λ_{rel}	N_e (kN)	σ_e (MPa)	
140,1	3,04	15,92	5,90	
Colunas com reforço (MLCA)				
λ	λ_{rel}	N_e (kN)	$\sigma_{e,mad}$ (MPa)	$\sigma_{e,aço}$ (MPa)
95,3	2,06	72,89	12,76	213,6

Fonte: Autora, 2025.

Utilizando-se a Equação 2, e admitindo uma tensão, no limite de proporcionalidade, da ordem de 50% da resistência à compressão média obtida, conforme a Tabela 17, e com módulo de elasticidade de 11944 MPa, obteve-se o índice de esbeltez mínimo de 65. Desta forma, tanto para as colunas em MLC quanto para aquelas em MLCA, evidenciou-se a possibilidade de fazer uso da equação de Euler para estimar a força crítica e a respectiva tensão (N_e e σ_e).

Em relação a força crítica das estruturas, é possível observar que as colunas em MLCA apresentariam potencial para rigidez 457% superiores às colunas sem as chapas de aço. Já para a tensão crítica, considerando a área homogeneizada das colunas em MLCA, as colunas com reforço em aço seriam 216% (12,75/5,9), mais resistentes que as colunas sem os reforços.

4.3.4 Estimativa de força conforme a NBR 7190

Nesta seção são descritos os cálculos realizados para a verificação estrutural da coluna submetida à compressão. Esta análise, objetivou estipular possíveis carregamentos limites de projeto seguindo as prescrições da ABNT NBR 7190:2022-

1. As verificações foram feitas considerando a seção da coluna em MLC, e a seção homogeneizada da coluna em MLCA.

Conforme apresentado na Tabela 18, utilizou-se os índices de esbeltez e o índice de esbeltez relativo correspondente à flexão em x para determinar os valores de k_x e k_{cx} para as colunas em MLC, e em MLCA. Nesta pesquisa, considerou-se que a resistência à compressão é igual à resistência na flexão. Segundo a ABNT NBR 7190:2022-1, para colunas em que a instabilidade lateral pode ocorrer, o desvio no alinhamento axial da peça medido na metade da distância entre os apoios não deve ultrapassar L/500 para peças em MLC. Para esta pesquisa, esse deslocamento máximo seria de 3,64 mm, sendo que o maior deslocamento inicial apresentado pelas estruturas foi igual a 2 mm. Assim, foi considerada a hipótese mais favorável ao bom desempenho do material e à geometria da estrutura, assumindo que a estrutura é uma coluna ideal onde o carregamento é aplicado no centro da seção transversal ($e = 0$). Ao aplicar na Equação 10, obtém-se a força máxima que pode ser aplicada na coluna em MLC, e na coluna em MLCA.

$$\frac{N_{MLC}/2700}{0{,}11 \times 55{,}32} + \frac{0}{55{,}32} + 0{,}7\frac{0}{55{,}32} \leq 1 \therefore N_{MLC} = 15{,}70 \text{ kN} \quad (29)$$

$$\frac{N_{MLCA}/5715}{0{,}22 \times 55{,}32} + \frac{0}{55{,}32} + 0{,}7\frac{0}{55{,}32} \leq 1 \therefore N_{MLCA} = 70{,}43 \text{ kN} \quad (30)$$

Percebe-se que conforme o dimensionamento da ABNT NBR 7190:2022-1, as colunas com reforço em aço deveriam suportar carregamentos 4,5 vezes maiores que as colunas sem aço. Outro fato interessante é que as forças máximas foram próximas àquelas estimadas conforme a equação de Euler, apresentadas na Tabela 18.

Conforme pode-se observar das Equações 29 e 30, os coeficientes k_{cx} foram duas vezes mais rigorosos sobre as colunas em MLC, comparativamente às colunas de MLCA. Isto ocorreu dado que o índice de esbeltez das colunas sem reforço foi significativamente maior do que o índice daquelas com reforço.

A NBR 7190 (2022), além das propriedades geométricas do elemento estrutural, considera a resistência à compressão e o módulo de elasticidade para determinar os valores de k_x e k_{cx} que minoram a resistência à compressão e, consequentemente, a força máxima que pode ser aplicada em peças comprimidas. Já a equação de Euler, considera apenas as propriedades geométricas e o módulo de elasticidade para calcular essa força máxima. Assim, observa-se que, embora os métodos sejam distintos, os parâmetros adotados pela normativa resultam em valores semelhantes aos da teoria clássica da resistência dos materiais.

4.3.5 Rigidez das colunas à flexão

Os gráficos forças × deslocamentos obtidos no ensaio à flexão para as colunas, conforme a densidade aparente da madeira, estão apresentados na Figura 47. Ainda, o gráfico forças × deslocamentos referente à série completa das colunas está ilustrado na Figura 48, incluindo os valores máximos de deslocamento indicados pela ABNT NBR 7190:2022-1. No Apêndice C são apresentadas todas as leituras realizadas durante o ensaio das estruturas.

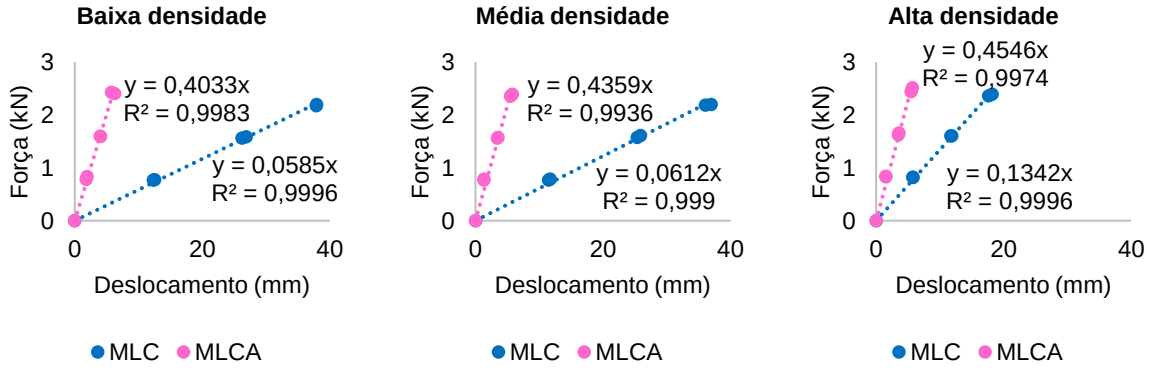


Figura 47 – Gráficos força × deslocamento obtidos no ensaio à flexão de colunas conforme a densidade aparente.

Fonte: Autora, 2025.

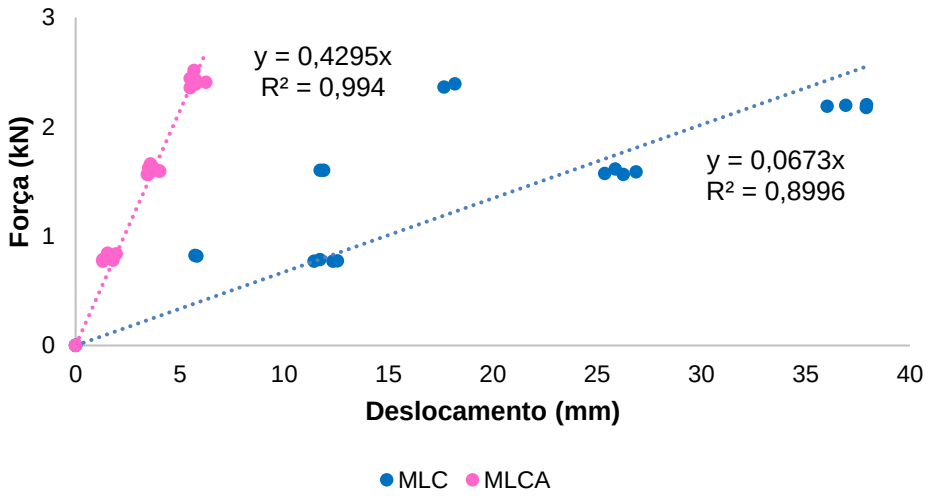


Figura 48 – Gráfico força × deslocamento para o ensaio à flexão das colunas.

Fonte: Autora, 2025.

Observa-se que as estruturas de baixa e média densidade em MLC, apresentaram rigidez semelhante. A coluna em MLC de alta densidade apresentou deslocamento médio de 1,79 cm, para o carregamento de 2,4 kN, sendo cerca de 2 vezes menor que os outros dois protótipos para o mesmo carregamento. Essa maior rigidez pode ser justificada pela densidade aparente média desta coluna. Enquanto esta coluna apresentava densidade igual a 0,777 g.cm^{-3}, as colunas de baixa e média densidade apresentavam 0,531 g.cm^{-3} e 0,596 g.cm^{-3}, o que corresponde a 68% e 77%, da densidade do primeiro, respectivamente. Ainda, é possível observar que a densidade da madeira teve uma influência maior nos deslocamentos das colunas em MLC, já para as colunas em MLCA, a densidade não afetou significativamente na rigidez.

Considerando o limite normativo menos rigoroso para deslocamentos verticais em elementos fletidos (L/300), tem-se que este deslocamento máximo era de 0,53 cm. Vale ressaltar que o valor do vão entre os apoios foi de 160 cm. Nota-se que a partir de um carregamento de 0,36 kN, as estruturas em MLC, já atingiriam tal deslocamento, enquanto as estruturas em MLCA, só atingiriam para um carregamento acima de 2,3 kN. Em relação ao limite de deslocamentos mais rigoroso (L/500), as colunas em MLC e MLCA atingiriam a flecha de 0,32 cm, para um carregamento de 0,2 kN e 1,4 kN, respectivamente. A partir das equações geradas pela regressão linear

da Figura 47, utilizando-se as médias, constatou-se que as colunas em MLCA foram 5,1 vezes mais rígidas que as colunas em MLC, o que foi superior à estimativa teórica, como apresentado na seção 4.3.3, que estimava este acréscimo de rigidez em 4,6 vezes. Embora o valor experimental (5,1) tenha sido superior ao teórico (4,6) é provável que tal diferença não se mantenha no caso de um maior número de repetições. Contudo, este é um bom indicativo do trabalho solidário entre a madeira e o aço.

A Figura 49 ilustra o esquema de carregamento da viga e sua geometria. Segundo Pinheiro *et al.* (2010), o deslocamento máximo ($f_{máx}$), para esta geometria de carregamento é dada pela Equação 31, em que P é a força de um pistão hidráulico; a é a distância entre o apoio até o carregamento; E é o módulo de elasticidade do material; I é o momento de inércia da seção e L é a distância entre os apoios.

$$f_{máx} = \frac{Pa}{24EI}(3L^2 - 4a^2) \tag{31}$$

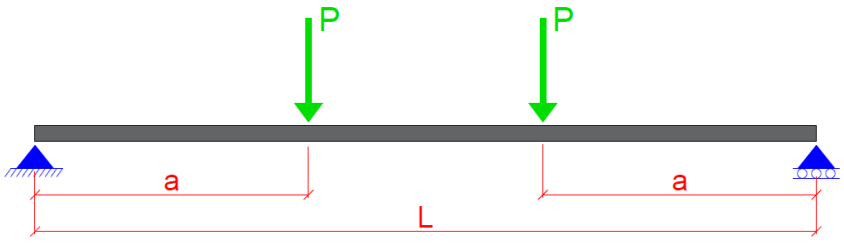


Figura 49 – Viga submetida à flexão em quatro pontos.

Fonte: Autora, 2025.

Desta forma, a partir dos deslocamentos registrados durante os ensaios de flexão, foram obtidas equações de regressão linear, e estimou-se o módulo de elasticidade de cada uma das colunas fletidas. Na Tabela 19 estão apresentados as equações e respectivos módulos de elasticidade para cada uma das unidades. Vale ressaltar que para gerar os gráficos (Figuras 47 e 48), utilizou-se o carregamento total, ou seja, igual a $2P$.

Tabela 19 – Módulo de elasticidade estimado a partir do ensaio de flexão

Estrutura	Equação	Módulo de elasticidade (MPa)
B-MLC	$f = 34{,}188P$	8934
B-MLCA	$f = 4{,}959P$	13453
M-MLC	$f = 32{,}679P$	9347
M-MLCA	$f = 4{,}588P$	14540
A-MLC	$f = 14{,}903P$	20495
A-MLCA	$f = 4{,}399P$	15164

Fonte: Autora, 2025.

Percebe-se que a presença do aço, especialmente para unidades de baixa e média densidades, permitiu um incremento de rigidez superior a 50%. Pelos baixos níveis de força aplicados nas estruturas para o ensaio à flexão, considerou-se que as colunas se mantiveram em regime elástico. A partir desta hipótese, foi possível avaliar as tensões normais atuantes no elemento por meio das leituras do relógio com resolução de 0,001 mm, instalados no bordo comprimido. Assim, nas Figuras 50 e 51, ilustra-se as tensões experimentais para as colunas em MLC e em MLCA em comparação às tensões teóricas.

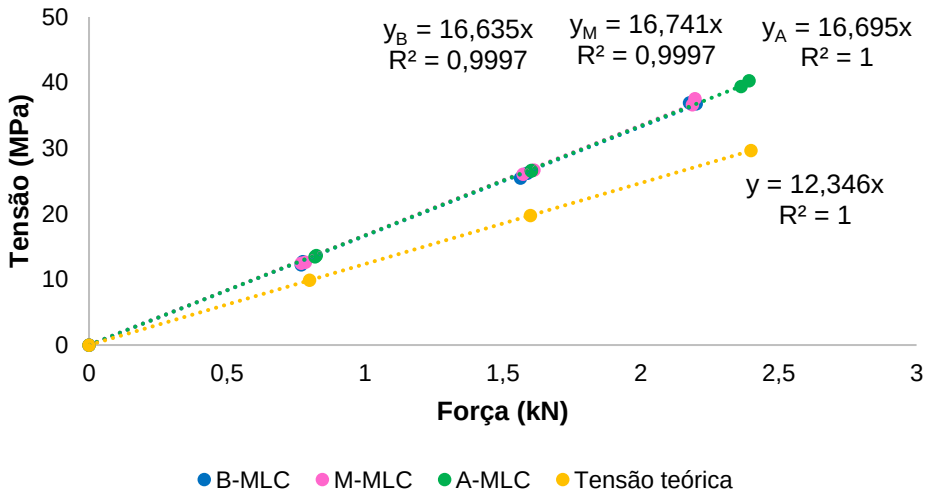


Figura 50 – Tensões normais experimentais e teórica para as colunas em MLC.

Fonte: Autora, 2025.

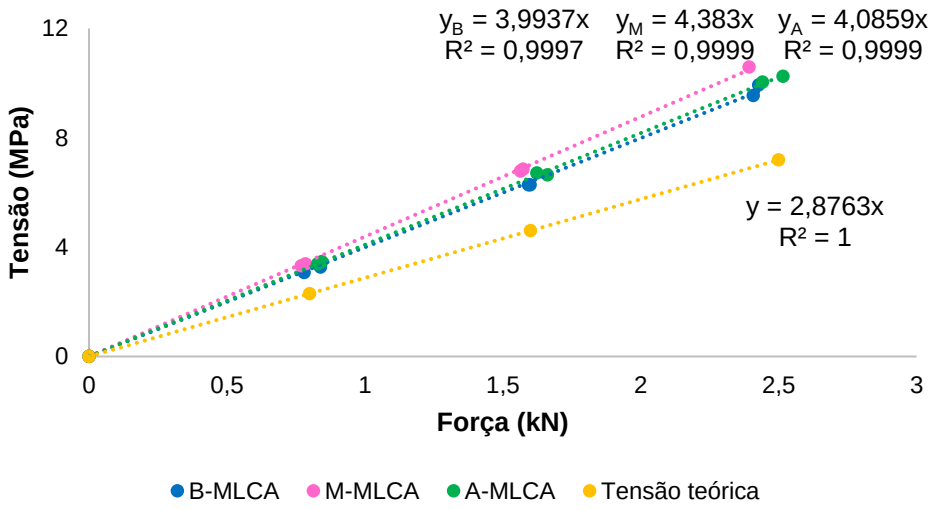


Figura 51 – Tensões normais experimentais e teórica para as colunas em MLCA.

Fonte: Autora, 2025.

Na Figura 50, observa-se que as colunas sem os reforços atingiram tensões da ordem de 38 MPa, correspondendo a cerca de 69% da resistência média à compressão deste lote de madeira. Admitindo-se que a madeira permanece no regime elástico para algo em torno de 50% de sua resistência, pode ter-se iniciado a fase de plastificação da madeira, especialmente para a peça de baixa densidade. Desta forma, a aplicação de carregamentos elevados pode ter comprometido a análise das colunas sob compressão, principalmente para a coluna de menor densidade.

Nota-se que tanto para as colunas em MLC, quanto para as colunas em MLCA, as tensões experimentais foram maiores que as tensões teóricas. Ao avaliar as equações geradas, observa-se que as colunas em MLC apresentaram, em média, tensões 35% superiores àquelas teóricas. Já para as colunas em MLCA, as tensões foram 44% superiores às teóricas. Ainda, pode-se destacar que, ao utilizar o módulo de elasticidade estimado para cada uma das estruturas ao invés do módulo de elasticidade médio, as tensões experimentais foram muito próximas independentemente da classe de densidade. Isto evidencia que os módulos de elasticidade estimados pelo ensaio de flexão, representaram com maior precisão a rigidez e, provavelmente também, a tensão atuante em cada unidade.

Um fato interessante ocorrido foi que as tensões experimentais das colunas sem reforço (MLC), foram mais de 4 vezes superiores às tensões experimentais das

colunas com reforço (MLCA), para mesmos níveis de força. Esta ocorrência já era esperada com valor teórico da ordem de 4,29 quando se avalia teoricamente o fato, utilizando-se a Equação 24. Tal resultado é uma boa evidência do trabalho solidário ocorrido entre o aço e a madeira.

4.3.6 Resistência e rigidez à compressão

Na Tabela 20, apresenta-se os resultados de resistência última à compressão oferecida pelas unidades testadas. São apresentadas, também, as densidades da madeira de cada unidade e, as forças axiais de flambagem elástica (Equação 1), estimadas com base no módulo de elasticidade à flexão, obtido anteriormente.

Tabela 20 – Valores de resistência para as colunas em MLC e em MLCA

Colunas sem reforço (MLC)				
Coluna	Densidade (g.cm^{-3})	$N_{ult,exp}$ (kN)	N_e (kN)	N_{NBR} (kN)
Baixa	0,531	13,38	11,9	15,70
Média	0,596	25,05	12,45	15,70
Alta	0,777	59,09	27,31	15,70
Média	0,635	32,51	17,22	15,70
C.V. (%)	20,08	73,05	50,77	-
Colunas com reforço (MLCA)				
Coluna	Densidade (g.cm^{-3})	$N_{ult,exp}$ (kN)	N_e (kN)	N_{NBR} (kN)
Baixa	0,528	58,74	82	70,43
Média	0,593	47,54	88,63	70,43
Alta	0,788	82,19	92,43	70,43
Média	0,636	62,82	87,69	70,43
C.V. (%)	21,27	28,15	6,02	-

Fonte: Autora, 2025.

Convém destacar que todas as unidades sofreram flambagem elástica, ou seja, manifestaram perda da estabilidade lateral, na direção esperada, para tensões normais inferiores ao limite de proporcionalidade da madeira à compressão. Esta afirmação é assertiva no caso das colunas em MLC. Contudo, parece igualmente adequada no caso das colunas com reforço quando se considera a seção transversal

equivalente em madeira. Na Figura 52, ilustra-se uma das colunas em MLCA sendo ensaiada, destacando a ocorrência de instabilidade em torno no eixo *x*, conforme previsto. A flambagem elástica era esperada dado o elevado índice de esbeltez utilizado na experimentação (140), valor limite para a realidade nacional conforme ABNT NBR 7190:2022-1, no caso das peças em MLC.

Figura 52 – Ensaio da coluna em MLCA de alta densidade à compressão (A) e ocorrência da flambagem elástica da estrutura (B).

Fonte: Autora, 2025.

As chamadas forças críticas (N_e), obtidas da equação de Euler e apresentadas para cada unidade experimental na Tabela 20, devem ser interpretadas com cuidado. Conforme citam Timoshenko e Gere (1984), tal valor seria o máximo de força centrada que uma coluna de material homogêneo, isento de imperfeições, poderia suportar na iminência de instabilidade lateral. Portanto, é valor teórico de uma situação idealizada,

muito dificilmente conseguida na experimentação. Como consequência, o que se esperava era que nenhuma unidade conseguisse suportar esta força. Conforme se observa na Tabela 20, todas as unidades de MLCA, comportaram-se como esperado, ou seja, suas forças últimas ficaram abaixo das forças críticas. Ao contrário, todas as unidades em MLC sofreram instabilidade com forças superiores às críticas. Neste caso a explicação não é tão fácil de ser obtida. Contudo, acredita-se que as condições de vínculo, por exemplo (apoios metálicos nas extremidades), tenham imposto alguma rigidez à rotação e, ainda, para tais peças de menor inércia, esta rigidez adicional tenha permitido a absorção de mais força. Mesmo assim, em futuras pesquisas, o assunto merece melhor avaliação.

Para todas as classes de densidade houve ganho de resistência com a adição das chapas de aço como reforço. O aumento de resistência foi tanto maior quanto menor a densidade da madeira usada, tendo variado de 40% (alta densidade) a mais de 400% (baixa densidade). Portanto, é possível observar que a densidade da madeira influenciou na resistência. Nota-se que quanto maior é a densidade da madeira maior é a resistência tanto para as estruturas em MLC, quanto para as estruturas em MLCA. Ao correlacionar essas duas variáveis, obteve-se coeficiente de correlação igual a 0,99 para as colunas em MLC, e igual a 0,84 para as colunas em MLCA. Em média, o ganho de resistência observado com adição do aço equivaleu a um adicional de força igual a 1,93 vezes a força média das unidades sem aço. Em teoria, este ganho estaria permitindo um aumento de resistência de 2,12 vezes, haja vista a área equivalente em madeira, advinda do reforço. Então, no quesito resistência, obteve-se uma eficiência da ordem de 91% ($1{,}93/2{,}12$), o que parece satisfatório. Contudo, houve alta variabilidade nos incrementos de resistência por classe de densidade, o que merece mais investigações.

Após o ensaio à compressão, verificou-se que as colunas em MLCA, de baixa e média densidade apresentaram descolamento da chapa de aço em um pequeno trecho de uma das extremidades. Vale ressaltar que esse descolamento foi cerca de10 cm, ao longo do comprimento das colunas, representando menos de 6% do comprimento total. Isto pode ter ocorrido em função da presença de deformações plásticas no aço, resultantes do processo de carregamento, que se destacam após o descarregamento. Ainda, essa ocorrência pode ser considerada como uma evidência

que os parafusos auxiliaram na contenção do descolamento do plano colado na ocorrência de instabilidade das unidades.

A avaliação do desempenho das colunas pode também ser julgada por meio da estabilidade lateral sob carregamento. Foi pensando neste quesito que se instrumentou cada coluna testada com um relógio comparador que mensurava o deslocamento lateral da unidade, sob força crescente. Nas Figuras de 53 a 55, apresenta-se um comparativo dos deslocamentos laterais entre colunas de mesma classe de densidade, com e sem reforço em aço. Todas as leituras dos deslocamentos realizado durante os ensaios das colunas estão apresentadas no Apêndice C.

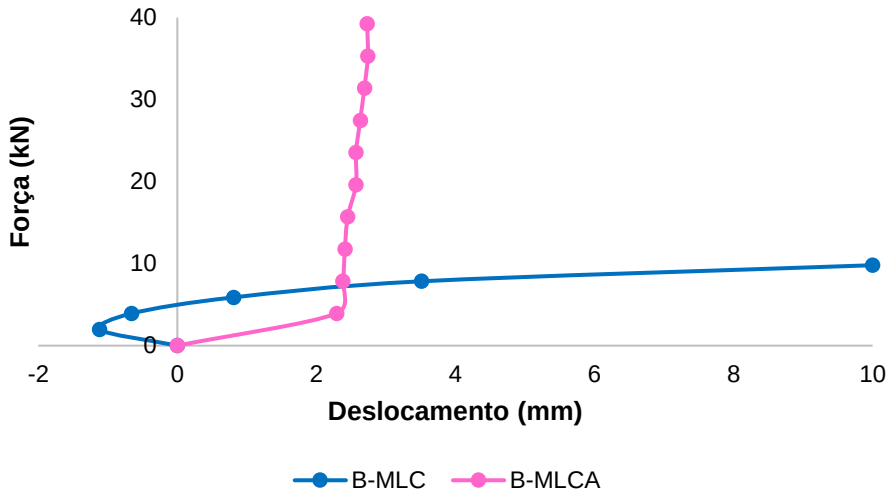


Figura 53 – Força × deslocamento lateral para as unidades de baixa densidade.

Fonte: Autora, 2025.

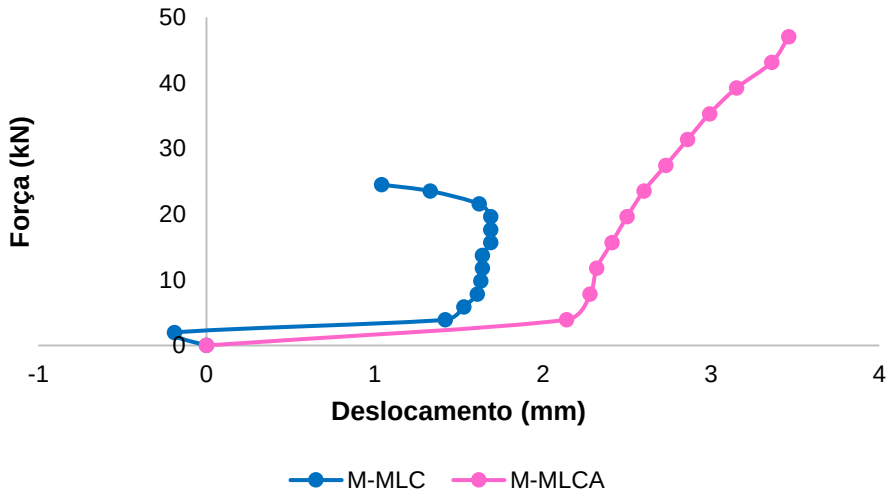


Figura 54 - Força × deslocamento lateral para as unidades de média densidade.

Fonte: Autora, 2025.

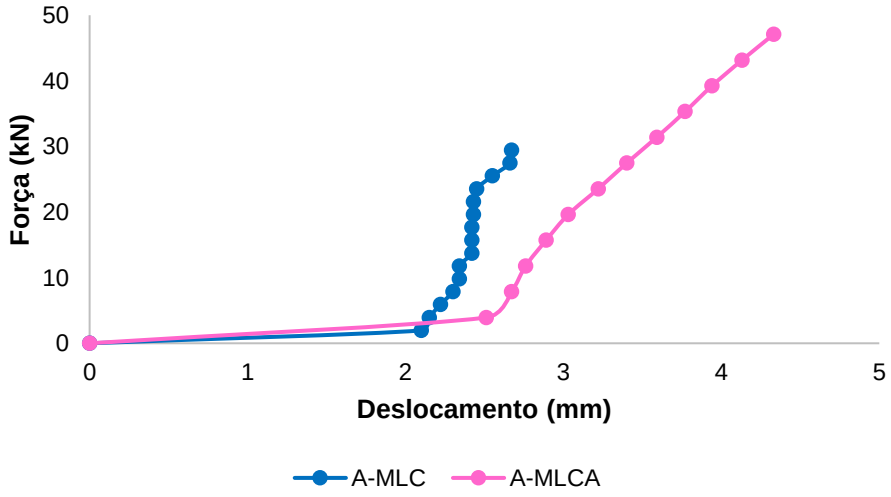


Figura 55 - Força × deslocamento lateral para as unidades de alta densidade.

Fonte: Autora, 2025.

Para a maioria das unidades testadas percebeu-se um deslocamento horizontal expressivo nos primeiros níveis de força. Excetuando a coluna de MLC de baixa densidade, este deslocamento horizontal inicial foi, em média, igual a 2,1 mm. Tal deslocamento pode ser considerado como uma excentricidade inicial. Na opinião de alguns autores é muito difícil, ou mesmo impossível, garantir aplicação de força centrada em colunas reais (Hibbeler, 2009). No caso deste trabalho, após algumas

análises, percebeu-se que a causa desta excentricidade inicial de mais de 2 mm foi o sistema adotado para fixação dos apoios metálicos utilizados nas extremidades. Depois da fixação destes apoios, uma “folga” não intencional fez com que a acomodação do sistema sob força, implicasse em um deslocamento lateral inicial desta magnitude, conforme ilustrado na Figura 56.

Figura 56 – Evidência de excentricidade inicial nas colunas sob aplicação de força, destacando o deslocamento do apoio.

Fonte: Autora, 2025.

De modo geral, conforme ilustrado acima, as unidades com reforço em aço não necessariamente apresentaram uma maior rigidez sob força de compressão, exceto para as unidades de baixa densidade. Contudo, as unidades com aço conseguiram absorver maiores níveis de forças de compressão, ou seja, a presença do aço permitiu aumentar os níveis dos carregamentos aplicados. Uma ocorrência interessante, ainda, foi observada no caso da peça sem reforço de média densidade, que, a partir de 20 kN, teve inversão no sentido do deslocamento horizontal. Nesta

peça, ainda, houve uma inversão logo no início do carregamento. Para a peça de MLC de baixa densidade também se observou uma inversão no início do carregamento.

A Figura 57, apresenta os gráficos forças x deslocamentos horizontais laterais para todas as unidades de testadas. Com exceção da coluna em MLC de baixa densidade, o que se percebe no geral, é que, após um deslocamento muito expressivo para forças iniciais, a forma de incrementar mais deslocamentos é muito similar, independentemente da existência de reforço. Mas as unidades com reforço (MLCA), foram capazes de resistir a maiores forças de compressão. Percebe-se que a coluna em MLC, de baixa densidade apresentou comportamento distinto das demais estruturas. Como citado no item 4.3.5, pode ter ocorrido a plastificação da madeira por conta do carregamento aplicado no ensaio à flexão.

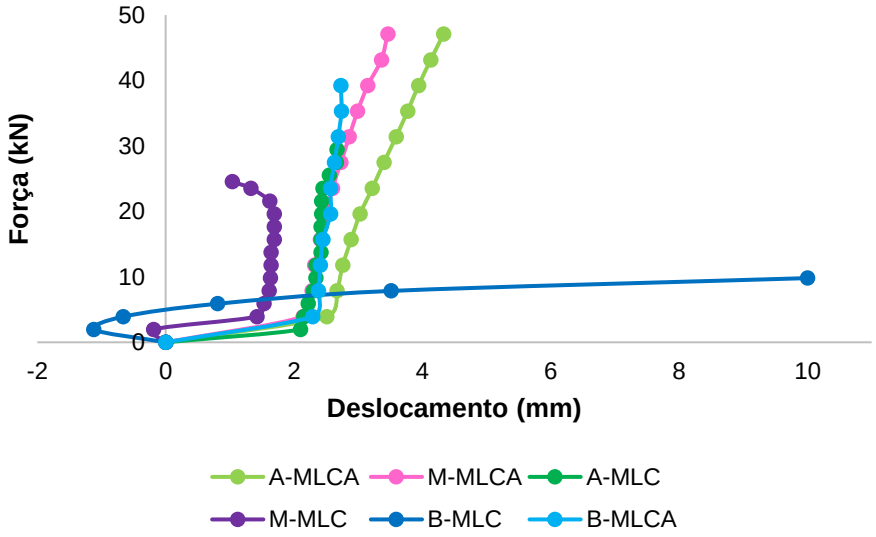


Figura 57 – Gráfico forças × deslocamentos laterais para todas as unidades

Fonte: Autora, 2025.

A instalação dos relógios R1 e R2, em faces opostas e nas posições equivalentes aos reforços em aço, objetivou mensurar os encurtamentos (caso normal), ou eventuais alongamentos sofridos pelas faces na presença de forças normais e momentos fletores. Tais relógios, com resolução de milésimo de milímetro, permitiram calcular as tensões normais atuantes, admitido o regime elástico. A existência de regime elástico parece estar garantida considerando os níveis de tensão atuantes no experimento.

Para calcular os níveis de tensão atuantes nos elementos estruturais, aplicou-se a Equação 23. Para a construção dos gráficos assumiu-se os módulos de elasticidade para cada unidade obtido no ensaio à flexão.

As Figuras 58 a 63, ilustram para as três classes de densidade estudadas, as tensões experimentais calculadas a partir dos registros dos relógios R1 e R2, bem como suas médias. Parece adequado alertar que, no caso das seções com reforço, a área da seção transversal resistente, tomada equivalente em madeira, foi admitida em 57,15 cm^2, conforme exposição na seção 4.3.3. Nestes casos (MLCA), a área da seção transversal resistente admitida só é aceita em situações nas quais as chapas de aço estejam trabalhando de forma solidária, ou seja, quando não houver deslizamentos recíprocos entre o aço e a madeira.

Neste contexto, para as unidades sem reforço em aço (MLC), a análise é mais simples e as tensões experimentais e teóricas estão ilustradas nas Figuras 58 a 60. Para as colunas sem reforço em aço, as tensões normais de compressão teóricas ficaram muito próximas das tensões experimentais médias. A maior diferença observada entre as tensões foi para a unidade de baixa densidade, que exibiu tensões experimentais 29% maiores que as tensões teóricas para forças extremas.

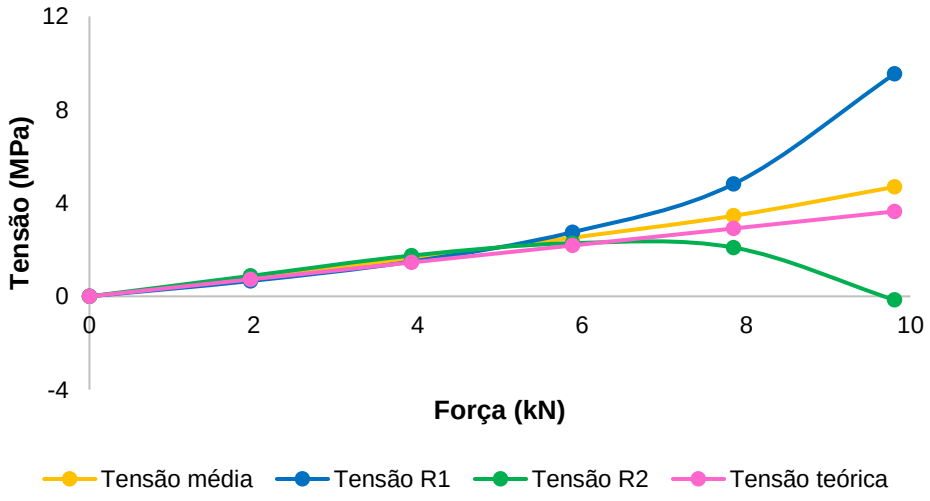


Figura 58 – Tensões experimentais e teórica para coluna em MLC de baixa densidade.

Fonte: Autora, 2025.

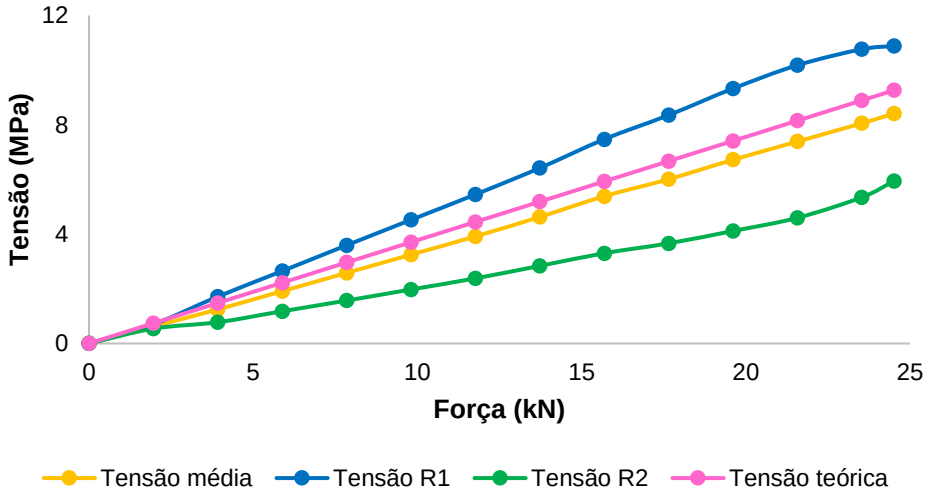


Figura 59 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLC de média densidade.

Fonte: Autora, 2025.

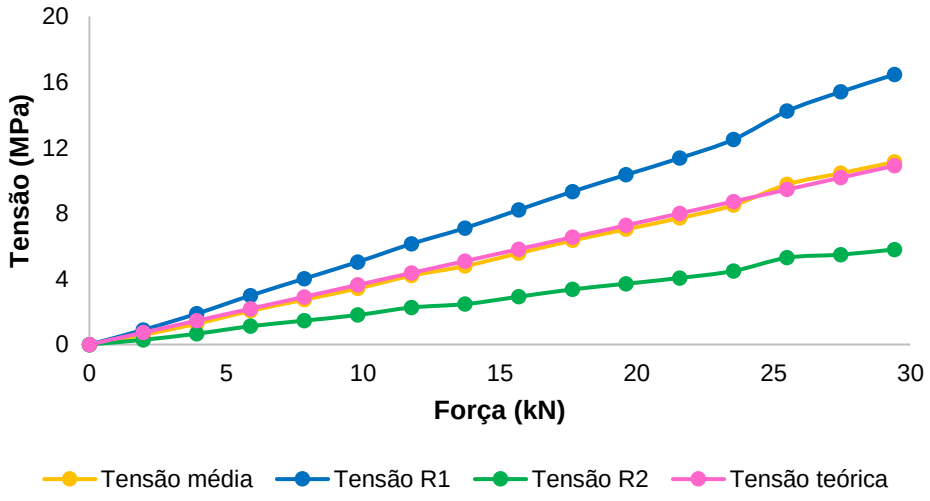


Figura 60 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLC de alta densidade.

Fonte: Autora, 2025.

Nas Figuras 61, 62 e 63, se apresenta as tensões normais experimentais e teóricas para as colunas com reforço em aço. Conforme se apresenta, no caso geral, também houve boa concordância entre as tensões teóricas e as experimentais calculadas pela Equação 23. A área da seção transversal resistente foi adotada com sendo 57,15 cm^2, dada a seção transformada em madeira, conforme seção 4.3.3.

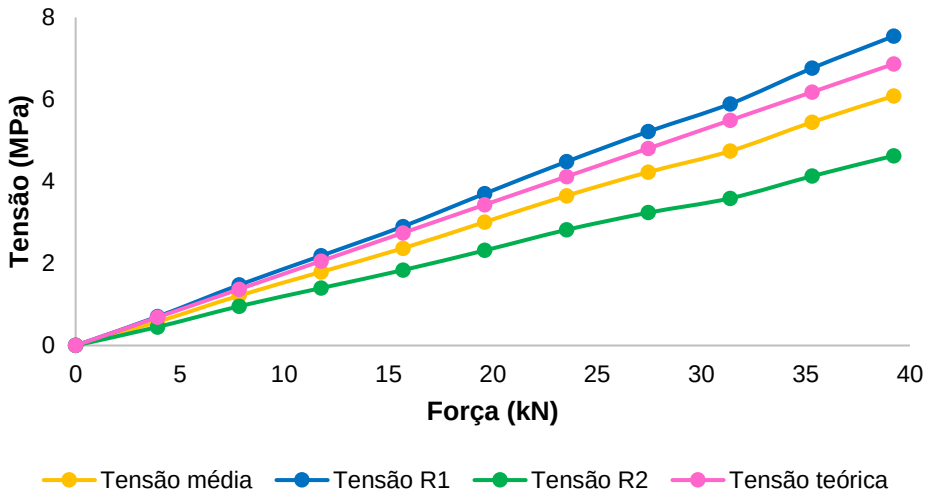


Figura 61 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLCA de baixa densidade.

Fonte: Autora, 2025.

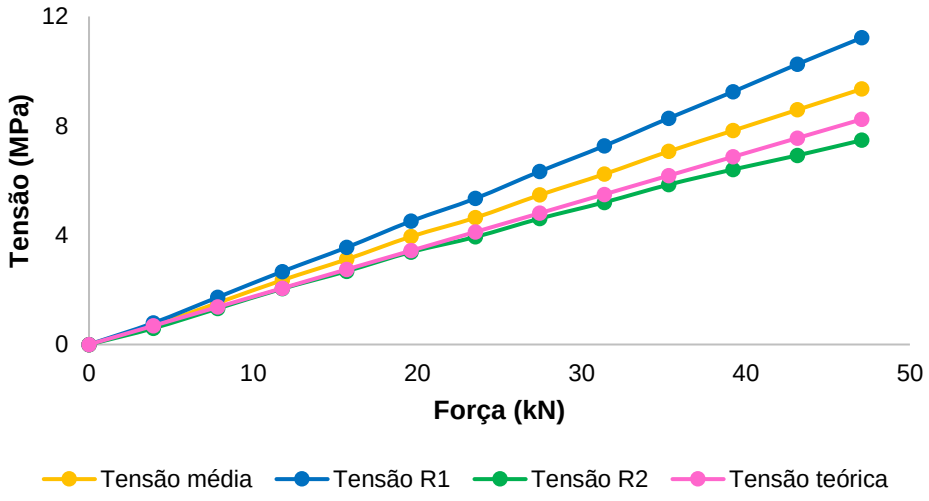


Figura 62 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLCA de média densidade.

Fonte: Autora, 2025.

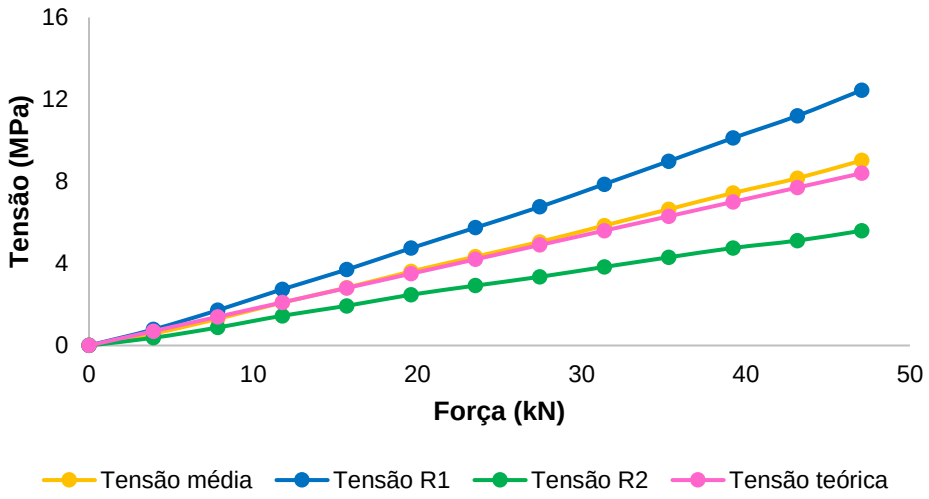


Figura 63 - Tensões experimentais e teórica para coluna em MLCA de alta densidade.

Fonte: Autora, 2025.

Para as três unidades com reforço em aço houve equivalência entre as tensões teóricas e as experimentais. A maior diferença encontrada foi para a unidade de média densidade, esta apresentou tensões médias experimentais da ordem de 14% maiores que as tensões teóricas. Apenas para a coluna em MLCA, de baixa densidade as tensões calculadas pela Equação 24 foram maiores que aquelas calculadas pela média dos registros de deformação dos relógios R1 e R2. Contudo, em todos os casos, as tensões experimentais calculadas apresentaram boa concordância com as tensões teóricas.

Uma análise adicional pode ser feita quanto aos níveis de tensão suportados pelas duas categorias de colunas. Considerando a tensão de 6 Mpa, como referência, as colunas em MLCA só atingiram tais tensões médias sob carregamentos da ordem de 35 kN. Já as colunas em MLC, com exceção da coluna de baixa densidade, alcançaram o mesmo nível de tensão para carregamentos menores, em torno de 17 kN. Portanto, as estruturas em MLCA, suportaram carregamentos aproximadamente duas vezes superiores aos das colunas sem os reforços para o mesmo nível de tensão. Isto pode ser considerado como uma evidência do trabalho solidário entre a madeira e o aço na absorção dos esforços.

Considerada a proximidade das tensões teóricas e experimentais, pode-se dizer que a presença de reforços colados em aço nas colunas de madeira permitiu a transmissão de boa parte do esforço para o aço, auxiliando a madeira. Pode, entretanto, ter havido, em algum grau, deslizamento entre os materiais e esta hipótese exigirá mais investigações dado que não houve instrumentação para verificar este fenômeno.

4.4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciaram que as colunas com reforço em aço apresentaram desempenho mecânico superior às colunas sem reforço. Teoricamente, as colunas em MLCA, deveriam ser 4,6 vezes mais rígidas que as colunas em MLC. No entanto, ao avaliar o comportamento das estruturas sob esforço de flexão, verificou-se que as colunas em MLCA foram 5,1 vezes mais rígidas do que as unidades em MLC.

No ensaio à compressão, todas as colunas manifestaram perda da estabilidade para tensões inferiores à resistência da madeira à compressão.

Quanto à resistência, as colunas em MLCA foram, em média, 93% mais resistentes que as colunas em MLC, com uma eficiência média da ordem de 91%, uma vez que, teoricamente, seriam 2,12 vezes mais resistentes.

As estruturas com reforço em aço não apresentaram um aumento significativo na rigidez em comparação às estruturas sem reforço, no ensaio de compressão. Contudo, as colunas mistas de aço e madeira foram capazes de suportar níveis de força de compressão mais elevados.

O adesivo epóxi foi eficiente para solidarização das chapas de reforço com a madeira e a presença de parafusos auxiliares parece ter contribuído para conter o possível descolamento das chapas em situação de flambagem.

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se uma instrumentação que consiga avaliar eventuais deslocamentos recíprocos no plano colado aço/madeira. Esta investigação pode avaliar objetivamente se os materiais trabalham de forma solidária. Ainda, sugere-se a realização de trabalhos que consigam avaliar de maneira mais aprofundada a interferência da densidade no desempenho de

colunas com reforço. Isto se justifica, uma vez que a resposta mecânica do reforço foi mais significativa em peças de baixa densidade.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSÕES GERAIS

Nesta tese, foram desenvolvidas três pesquisas principais com o objetivo de investigar tecnologias voltadas para estruturas em MLC, com ênfase em diferentes adesivos e na utilização de reforços em aço. No Capítulo II, avaliou-se a resistência de juntas de *Pinus* sp. coladas com adesivo poliuretano monocomponente (1C-PUR), em diferentes ângulos de colagem, analisando a influência da tipologia do esforço (compressão e torção), no desempenho mecânico. O trabalho desenvolvido no Capítulo III, analisou a resistência ao cisalhamento de juntas de *Pinus* sp. coladas com adesivo epóxi, aplicando diferentes pressões e consumos de adesivo, com o objetivo de otimizar os parâmetros de colagem. Por fim, no Capítulo IV, investigou-se o desempenho estrutural de colunas em MLC com e sem reforços em aço, avaliando o comportamento das estruturas sob esforços de flexão e compressão. A seguir, apresentam-se os principais resultados e conclusões obtidos, além de sugestões para pesquisas futuras no âmbito de estruturas em madeira.

No Capítulo II, os resultados indicaram que o ângulo de colagem influencia na resistência ao cisalhamento de juntas coladas, especialmente no ensaio à compressão. A fórmula de Hankinson foi eficaz somente para estimar essa resistência na compressão, quando há variação dos ângulos de colagem. Além disso, o percentual de falha na madeira apresentou valores baixos em todas as condições avaliadas, independentemente do esforço aplicado. Os resultados obtidos, ainda são dependentes da tipologia do ensaio conduzido, neste caso, compressão ou torção.

No Capítulo III, verificou-se que o adesivo epóxi Araldite pode ser utilizado na confecção de estruturas em MLC. Ainda, constatou-se que o aumento da pressão de colagem reduziu a resistência ao cisalhamento na linha de cola, enquanto a variação da gramatura do adesivo não apresentou efeito estatisticamente significativo. No entanto, recomenda-se um consumo mínimo de 150 $g.m^{-2}$, para garantir melhor trabalhabilidade do adesivo e evitar a formação de uma junta de cola dita faminta.

No Capítulo IV, constatou-se que as colunas em MLC, com reforço em aço apresentaram um desempenho mecânico superior em comparação às colunas sem reforço. Na flexão, as unidades reforçadas foram mais rígidas, superando as expectativas teóricas e, na compressão, as colunas não apresentaram aumento

significativo de rigidez, mas suportaram cargas, em média, 93% maiores do que aquelas sem reforço, evidenciando maior eficiência estrutural.

Com base nesses resultados, visando pesquisas futuras que possam contribuir na tecnologia de elementos estruturais em MLC, recomenda-se:

- Estudos com diferentes adesivos e espécies de madeira, especialmente as de reflorestamento;
- Desenvolvimento de modelo unificado para tentar estimar a resistência ao cisalhamento na torção em diferentes ângulos de colagem;
- Avaliação do desempenho de juntas coladas sob condições ambientais adversas (umidade, temperatura etc.), especialmente para novos adesivos; e
- Análise do comportamento de estruturas mistas de madeira e aço com instrumentação que possa verificar os eventuais deslocamentos recíprocos no plano colado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden* na qualidade da colagem. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 803–811, 2012.

ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; MACEDO, L. B.; MACÊDO, A. N.; DIAS, A. A.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JR., C. Caracterização completa da madeira de espécie amazônica paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37. n. 6. p. 1175-1181, 2013.

ALVIM, R. C. **Projeto de estruturas de madeira**: peças compostas comprimidas. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTINGAND MATERIALS. **D 2559:** Standard Specification for adhesives for bonded structural wood products for use under exterior exposure conditions. Pennsylvania, 2016.

_____. **D 1002**: Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal). Pennsylvania, 2019.

_____. **D 5266**: Standard practice for estimating the percentage of wood failure in adhesive bonded joints. Pennsylvania: 2005.

_____. **D 905:** Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Pennsylvania, 2013.

APRILANTI, M. D. **Influência de um corte na borda tracionada de uma viga maciça simulando uma emenda de topo na lâmina inferior de vigas laminadas coladas.** 2010. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências: recursos florestais com opção em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.

ARAUJO, V. A.; GARCIA, J. N.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L. Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesq. flor. bras.**, v. 37, n. 90, p. 189-200, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo setorial 2019**: ano base 2018. Curitiba, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:** Projeto de estruturas em madeira. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7190-1:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7190-2:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7190-3:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7190-6:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural. Rio de Janeiro, 2022.

AZEVEDO, E. C. de. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. 2009, 153f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R. **Resistência dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 1995.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos materiais.** 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

BIANCHE, J. J**. Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. 98f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de Eucalyptus sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00077114, 2017.

BILA, N. F.; IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G. Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeiras tropicais da Amazônia. **Florestas**, v. 6, n. 4, p. 455-464, 2016.

BISSOLI-DALVI, M.; FERRES, S. C.; ALVAREZ, C. E.; FUICA, G. E. S. Avaliação da sustentabilidade da madeira por meio da ferramenta ISMAS. **Floresta e Ambiente**. v. 24. p. e00077214, 2017.

BOLGENHAGEN, A.; HORST, D. J.; PETTER, R. R. H.; BORMANN, O. R. Assessing the physical and mechanical properties of three native species from Southern Brazil. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 1, p. 23-30, 2015.

BRUNDTLAND, G. H. Our Common Future. **World Commission on Environment and Development.** Oxford University, Oxford University Press, 1987. Disponível em: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>. Acesso em: 07 jul. 2023.

CALIL JR, C.; DIAS, A. A. Uso da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.1, n. 1, p. 71-77,1997.

CANADIAN WOOD COUNCIL. **Energy and the Environment in Residential Construction**. Ottawa, CWC, 2004.

CARVALHAR, F. C. **Determinação experimental da carga de flambagem e da excentricidade acidental de pilares compostos de madeira.** 2001, 97f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

CORDEIRO JR, C. R.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. T. M. L. Uso da madeira na construção civil. **Projectus**, v. 2, n. 4, p. 79-93, 2017.

COURI PETRAUSKI, S. M. F.; PETRAUSKI, M. C.; PETRAUSKI, A.; POSSA, D. C.; AZEVEDO, R. L.; PRIOR, M. 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, p. e440111436464, 2022.

COURI PETRAUSKI, S. M. F.; SILVA, J. C.; PETRAUSKI, A.; DELLA LUCIA, R. M. Analysis of eucalyptus glued-laminated timber porticos structural performance. **Revista Árvore**, v. 40, n. 5, p. 931-939, 2016.

CRUZ, H.; NUNES, L. **A madeira como material de construção**. Núcleo de Estruturas de Madeira. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, 2005.

CURY, G.; FILHO, M. T. Descrição anatômica de espécies de madeira utilizadas na construção civil. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 3, p. 227-236, 2011.

DE LUCA, V.; MARANO, C. Prestressed glulam timbres reinforced with steel bars. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 206–217, 2012.

DE PAULA, A. C. **Avaliação do percentual de falha de juntas coladas.** 2020. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

FILIPPINI, D. F.; PETRAUSKI, A.; COURI PETRAUSKI, S. M. F.; SANTOS, E. P.; JORDAN, R. A. Fabrication and testing of glued-laminated timber frames with reinforced connections. **Engenharia Agrícola**; v. 43, n. 2, p. e20220198, 2023.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira.** 2002. 168f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FRIHART, C. R. **Wood adhesion and adhesives**: handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton: CRC, 2005.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. **Wood handbook** - Wood as an engineering material - Chapter 10 - Wood Adhesives. Madison: WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. 543 p.

GOMES, N. B. **Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190: 2013.** 2018. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G. A.; SCHAYDER, L. C.; TINTI, V. P.; SANTIAGO, S. B. Avaliação da resistência ao cisalhamento da madeira de Pinus sp. coladas em temperatura ambiente. **Ciência da Madeira**, v. 7, n. 1, p. 42-50, 2016.

GOSSLER, F. S. **Avaliação do uso do amido como emulsificante na polimerização em emulsão de poli (acetato de vinila) em adesivos.** 2020, 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

HADI, Y. S.; HERMAWAN, D.; SULASTININGSIH, I. M.; BARSI, E.; PARI, G.; PARI, R.; ABDILLAH, I. B. Color change and physical-mechanical properties of polystyrene-impregnated Glulam from three tropical fas-growing wood species. **Forest**, v. 12, n. 1420, 2021.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais.** 7. ed. São Paulo: Pearson Education: Prentice-Hall, 2009.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2022**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 16 jun. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2023**.São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 08 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura - PEVS**, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html>. Acesso em: 12 jul 2023.

KOMARIAH, R. N.; HADI, Y. S.; MASSIJAYA, M. Y.; SURYANA, J. Physical-mechanical properties of glued laminated timber made from tropical small-diameter logs grown in Indonesia. **Korean Wood Science and Technology**, v. 43, n. 2, p. 156-167, 2015.

LEHRINGER, C.; GABRIEL, J. **Review of recent research activities on one-component PUR-adhesives for engineered wood products**. In: AICHER, S.; REINHARDT, H. W. (eds). Materials and Joints in Timber Structures. RILEM Bookseries, v. 9, Springer: Dordrecht, 2014.

LONGUE, JR. D.; COLODETTE, J. L. Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 76, p. 429-438, 2013.

LOPES, M. C.; MUNIZ, G. I. B.; MATOS, J. L. M.; TANOBE, V. O. A.; CHINASSO, C. A. F.; ROSSO, S. Resistência da linha de cola de painéis de *Pinus taeda* colados lateralmente com diferentes adesivos. **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 613-619, 2013.

MADY, F. T. M. **Xiloteca da Universidade Federal do Amazonas**: Coleção Dr. Valmir Souza de Oliveira. Manaus: Eco & Companhia, 2017. 36 p.

MALHEIROS, T. F.; PHILIPPI JR., A.; COUTINHO S. M. V. Agenda 21 nacional e indicadores de desenvolvimento sustentável: contexto brasileiro. **Saúde soc.**, v. 17, n. 1, p. 7–20, 2008.

MARQUES, Jeanne Letícia da Silva**. Desenvolvimento de Adesivos Nanocompósitos de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona**. 2009, 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MATOS A. C.; JÚNIOR GUIMARÃES, J. B.; BORGES, C. C.; MATOS, L. C.; FERREIRA, J. C.; MENDES, L. M. Influência de diferentes composições de lâminas de *Schizolobium Parahyba* var*. amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby e *Pinus oocarpa* var. *oocarpa* (Schiede ex Schltdl) para produção de compensados multilaminados. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 124, p. 799-810, 2019.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifólia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Brasileira De Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 67-73, 2010.

MENDES, L.M.; SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. Variação da densidade da madeira de *Pinus oocarpa Schiede ex Schltd*l. no sentido longitudinal dos caules. **Cerne**, v. 5, n. 1, p. 102-111, 1999.

MENDONZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; RIBEIRO, A. S.; FERNANDES, F. B. Aspectos gerais sobre adesivos para madeira. **Multitemas**, v. 22, n. 51, p. 46-68, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Produtos madeireiros e não madeireiros**, 2023. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/florestas/manejo-florestal-sustent%C3%A1vel/produtos-madeireiros-e-n%C3%A3o-madeireiros.html#:~:text=%C3%89%20todo%20o%20material%20lenhoso,poste%2C%20moir%C3%A3o%2C%20entre%20outros.>. Acesso em: 18 mar. 2025.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009, 357f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MIURA, A. K.; SOUSA, L. P. **Produtos florestais madeireiros e não madeireiros.** Alternativas para diversificação da agricultura familiar de base ecológica – 2022. Documentos 527, p. 52-53, 2022.

MOLINA, J. C.; CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L. Resistência à tração de emendas dentadas de madeira de *Manilkara huberi* para o emprego em madeira laminada colada. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 221–277, 2016.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; SIMIONI, F. J.; OLIVEIRA, E. B. Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 85-94, 2016.

MÜLLER, U.; VEIGEL, S.; FOLLRICH, J.; GABRIEL, J.; GINDL, W. **Performance of 1C polyurethane in comparison to other wood adhesives**. In: ICWA 2009 International Conference on Wood Adhesives, Nevada, 2009.

NADIR, Y.; NAGARAJAN, P.; AMEEN, M.; ARIF, M. M. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 547-555, 2016.

NISHIMURA, M. D. L.; MERINO, G. S. A. D.; MERINO, E. A. D. Desenvolvimento sustentável, inovação e gestão de design: uma reflexão multidisciplinar para o desenvolvimento social sustentável. **DAPesquisa**, v. 15, n. 25, p. 1-19, 2020.

OLIVEIRA, M. P. **Síntese de novos estabilizantes poliméricos do tipo poli(álcool vinílico-co-neodecanoato de vinila) para utilização na copolimerização em miniemulsão do acetato de vinila (VAc) com o neo-nonanoato de vinila (VEOVA-9).** 2010. 266f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2010.

OLIVEIRA, M. P.; SERAPHIM, L. F. Resistência ao cisalhamento de juntas produzidas com três diferentes espécies de madeiras e adesivos vinílicos para aplicações não estruturais. **Árvore**, v. 39, n. 2, p. 375-384, 2015.

PADILHA, V. H. L.; PETRAUSKI, A.; SANTOS, A.; POSSA, D. C.; PETRAUSKI, S. M. F. C.; SAVARIS, G. Shear strength of pine wood bonded joints with different angles obtained using compression and torsional testing methods. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4727, 2023.

PANG, S. J.; OH, J. K.; HONG, J. P.; LEE S. J.; LEE, J. J. Stochastic model for predicting the bending strength of glued-laminated timber based on the knot area ratio and localized MOE in lamina. **J Wood Sci,** v. 64, p. 126–137, 2018.

PEDRESCHI, R.; GOMES, F. C.; MENDES, L. M. Avaliação do desempenho da madeira na habitação utilizando abordagens de sistemas. **Cerne**; v. 11, n. 3, p. 283-293, 2005.

PETRAUSKI, A.; COURI PETRAUSKI, S. M. F.; DELLA LUCIA, R. M.; PETRAUSKI; M. C. Methodology and device to obtain torsional shear strength of glued joints. **Floresta**, Curitiba, v. 50, n. 4, p. 1921-1930, 2020.

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

PIGOZZO, J. C.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; CALIL JR, C.; LAHR, F. A. R. Design and execution of wood-concrete deck bridge. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 28, n. 3, p. 1-10, 2018a.

PIGOZZO, J. C.; ARROYO, F. N.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Análise de barras de aço ancoradas na madeira utilizando adesivos estruturais. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 1, p. 145-156, 2023.

PIGOZZO, J. C.; CHAHUD, E.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; LAHR, F. A. R. Comparison of anchorage strength of bonded-in steel bars with epoxy resin, varying the superficial treatments and moisture after bonding, using *Corymbia citriodora* wood. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 28, n. 5, p. 1-6, 2018b.

PIMENTEL, T. S.; WIMMER, P.; CARVALHO, H. R.; ROITMAN, L.; MENEZZI, C. H. S. D. Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, e3753, 2021.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental.** Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz; 2022. 451 p.

PINHEIRO, L. M.; CATOIA, B.; CATOIA, T.; MOREIRA, M. V. N. **Tabelas de vigas:** deslocamentos e momentos de engastamento perfeito. Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Estruturas, 2010

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. 1 ed. New York: Marcel Dekker, 1994.

POPOV, E. P. **Resistência dos materiais**. PHB editora, 1984.

POSSA, D. C. **Construção e ensaio de pórticos com tirante em madeira laminada colada.** 2021. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2021.

POSSA, D. C.; PANASSOLO, P. H. S.; PETRAUSKI, A.; PETRAUSKI, M. C. Avaliação da resistência ao cisalhamento de elementos de madeira e aço colados com adesivo epóxi. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 7, p. e5702, 2024.

POSSA, D. C.; PETRAUSKI, A.; COURI PETRAUSKI, S. M. F.; SAVARIS, G.; JORDAN, R. A.; AZEVEDO, R. L. Construção e ensaio de pórticos com tirante em madeira laminada colada. **Research, Society and Development**, v. 20, n. 2, p. e52711226109, 2022.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Sobre a década da ONU**. 2020. Disponível em: <https://www.decadeonrestoration.org/pt-br/sobre-decada-da-onu>. Acesso em: 12 jul 2023.

R CORE TEAM. **R:** A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2022.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the tress: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333-359, 2017.

RIBEIRO, T. G. V. **Avaliação de pilares de madeira em escala reduzida com e sem reforços em aço**. 2024. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2024.

RIOS, P. D.; VIEIRA, H. C.; PEREIRA, G. F.; TURMINA, E.; NICOLETTI, M. F. Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus patula.* **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-5, 2018.

ROMA, J. C.; ANDRADE, A. L. C. Economia, concessões florestais e a exploração sustentável de madeira. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n. 8, p. 92-96, 2013.

SANTANA, C. C. D.; PESSOA, A. R. Sustentabilidade ilustrada. **ModaPalavra**, v. 15, n. 35, p. 135-183, 2022.

SANTIAGO, S. B.; GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; SEGUNDINHO, P. G. A.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C. Eucalypts wood glue with natural adhesives. **Revista Materia**, v. 23, n. 3, e-12151, 2018.

SANTOS, D. M. C.; MEDEIROS, T. A. Desenvolvimento sustentável e Agenda 21 brasileira. **Ciência Atual**, v. 15, n.1, p. 10-27, 2020.

SCOTT, G. **Mechanisms of Polymer Degradation and Stabilisation**. Elsevier Applied Science: London,1990.

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. **Matéria**, v. 26, n. 3, p. e13030, 2021.

SEGUNDINHO, P. G. A.; ZANGIÁCOMO, A. L.; CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; LAHR, F. A. R. Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum Warm.*). **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO – SFB. **Mapa das florestas do Brasil**, 2019. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/os-biomas-e-suas-florestas>. Acesso em: 9 jul 2024.

SHIGUE, L. S. **Difusão da construção em madeira no Brasil**: agentes, ações e produtos. 2018. 250f. Dissertação (Mestre em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SHIMIZU, J. Y. **Pínus na Silvicultura Brasileira**. Colombo: Embrapa Floresta, 2008. 223 p.

SOARES, L. S. Z. R.; SILVA, D. A. L.; PANZERA, T. H.; DIAS, A. M. P. G.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Estimativa de propriedades da madeira Mandioqueira pela frequência natural de vibração e pela densidade aparente. **Matéria**, v. 26, n. 3, p. e13051, 2021.

SOUZA, A. F. P. **A sustentabilidade no uso da madeira de floresta plantada na construção civil.** 2010. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SOUZA, M. F. S. M.; RODRIGUES, R. B.; MASCIA, N. T. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos.** Apostila do Departamento de Estruturas da Universidade Estadual de Campinas, 2008.

SOUZA, R. V.; DEMENIGHI, A. L. Tratamentos preservantes naturais de madeiras de floresta plantada para a construção civil. **Mix Sustentável**, v. 3, n. 1, p. 84-92, 2017.

STRINGARI, E. H.; PETRAUSKI, A.; COURI PETRAUSKI, S. M. F.; AZEVEDO, R. L.; SAVARIS, G. Construction and testing of glued laminated timber frames for use in laying poultry houses. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 122-131, 2020.

TEKBOND. **Ficha técnica:** Araldite Profissional. Embu das Artes: Tekbond, 2023. Disponível em: <https://www.tekbond.com.br/produtos/araldite/araldite-profissional>. Acesso em: 17 mar. 2025.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos Sólidos:** Volume II. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

TOMÉ, K. T. **Análise do desempenho estrutural de vigas com perfil I em madeira colada, utilizando três diferentes tipos de adesivos.** 2022. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2022.

TOMÉ, K. T.; PETRAUSKI, A.; POPSSA, D. C.; PADILHA, V. H. L.; PETRAUSKI, S. M. F. C.; PETRAUSKI, M. C. Shear strength of Pinus sp. Joints bonded with different grammages and pressures. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4716, 2023.

TORRESI, S. I. C.; PARDINI V. L.; FERREIRA, V. F. O que é sustentabilidade? **Quím Nova**, v. 33, n. 1, p. 1, 2010.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; BONDUELLE, G. M. Qualidade das juntas coladas de madeira de cinco espécies de Eucalyptus com adesivos acetato de polivinila e resorcina-formaldeído. **Madera bosques**, v. 26, n. 3, e2632064, 2020.

VALVERDE, S. R.; MAFRA, J. W. A.; MIRANDA, M. A.; SOUZA, C. S.; VASCONCELOS, D. C. **Silvicultura brasileira - oportunidades e desafios da economia verde.** Rio de Janeiro: FBDS, 2012. 40 p.

VARANDA, L. D.; YAMAJI, F. M.; SANTOS, L. R. O.; SILVA, D. A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical performance of particleboards using castor oil-based adhesive. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 10, p. 707-712, 2018.

VASQUES, A. G.; NOGUEIRA, A. S.; KIRCHNER, F. F.; BERGER, R. Uma síntese da contribuição do gênero Pinus para o desenvolvimento sustentável no sul do Brasil. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 445-450, 2007.

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 257-271, 2015.

WANG, Y.; HOU, Q.; XU, T.; QU, S.; ZHANG, B. The bending-shear behaviors of steel reinforced fast-growing poplar glulam beams with different shear-span ratios. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124008, 2021.

YANG, X. H.; XUE, W.; GUO, N. Bending performance of glued lumber beam reinforced with steel plate. Bending performance of glued-lumber beam reinforced with steel plate. **Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),** v. 47, n. 2, p. 468-477, 2017.

ZANGIÁCOMO, A.L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 21 – Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão das juntas coladas com adesivo poliuretano

Corpo de Prova	Grupo	Ângulo	d (g.cm^{-3})	U (%)	fv0 12% (MPa)	Falha na madeira (%)
0G1	G1	0	0,655	13,58	8,62	22,63
10G1	G1	10	0,650	13,44	10,41	31
20G1	G1	20	0,609	13,19	11,44	100
30G1	G1	30	0,650	13,54	10,58	55,63
45G1	G1	45	0,651	13,19	8,75	4,75
60G1	G1	60	0,657	13,04	6,36	12,88
70G1	G1	70	0,659	13,22	5,75	5,13
80G1	G1	80	0,661	12,95	6,18	4,5
90G1	G1	90	0,635	13,44	3,27	3,75
0G2	G2	0	0,637	13,04	9,89	33
10G2	G2	10	0,621	12,70	9,16	17,63
20G2	G2	20	0,605	13,47	11,01	26,13
30G2	G2	30	0,638	13,25	10,62	26,5
45G2	G2	45	0,631	13,52	5,60	21,5
60G2	G2	60	0,629	13,37	8,46	23,13
70G2	G2	70	0,627	13,42	7,94	34,25
80G2	G2	80	0,624	13,17	6,29	18,63
90G2	G2	90	0,626	13,03	6,83	16,88
0G3	G3	0	0,583	13,00	10,70	27,75
10G3	G3	10	0,592	13,13	8,34	11
20G3	G3	20	0,587	13,13	10,24	38,5
30G3	G3	30	0,575	13,10	9,70	62,63
45G3	G3	45	0,584	13,41	7,63	8,38
60G3	G3	60	0,576	13,36	6,90	27,25
70G3	G3	70	0,595	13,14	4,28	27
80G3	G3	80	0,562	13,26	3,82	31,63
90G3	G3	90	0,564	13,02	4,49	6,25
0G4	G4	0	0,556	13,09	7,36	12,75
10G4	G4	10	0,577	13,46	9,95	42,13
20G4	G4	20	0,585	13,04	7,16	24,38
30G4	G4	30	0,575	13,49	7,31	51,63
45G4	G4	45	0,583	13,65	8,58	30
60G4	G4	60	0,575	13,41	7,03	27,38
70G4	G4	70	0,589	13,68	4,96	29,13
80G4	G4	80	0,549	13,66	4,42	9,13

Continuação da Tabela 21

Corpo de Prova	Grupo	Ângulo	d (g.cm^{-3})	U (%)	fv0 12% (MPa)	Falha na madeira (%)
90G4	G4	90	0,556	13,43	3,20	15,25
0G5	G5	0	0,541	13,57	11,11	57,75
10G5	G5	10	0,544	13,35	10,19	41,25
20G5	G5	20	0,552	13,55	7,85	36,25
30G5	G5	30	0,565	13,36	10,46	25,88
45G5	G5	45	0,554	14,03	10,50	43,88
60G5	G5	60	0,513	13,57	4,76	25,63
70G5	G5	70	0,585	13,88	4,86	32,88
80G5	G5	80	0,536	13,12	4,18	22,13
90G5	G5	90	0,530	13,38	4,41	24,75
0G6	G6	0	0,528	13,81	9,29	39,88
10G6	G6	10	0,515	13,50	9,17	59,75
20G6	G6	20	0,523	13,59	9,68	37,38
30G6	G6	30	0,537	13,47	9,93	44,75
45G6	G6	45	0,508	13,62	7,96	16,88
60G6	G6	60	0,503	13,67	5,70	5,75
70G6	G6	70	0,530	12,52	6,19	26,38
80G6	G6	80	0,529	13,89	5,52	62,13
90G6	G6	90	0,512	14,20	3,85	25,63
0G7	G7	0	0,514	13,26	8,72	84,5
10G7	G7	10	0,483	14,11	8,23	35,25
20G7	G7	20	0,508	13,21	9,52	48,25
30G7	G7	30	0,497	13,83	7,52	40
45G7	G7	45	0,488	13,28	6,22	29,25
60G7	G7	60	0,583	13,22	7,04	25,13
70G7	G7	70	0,488	13,38	3,91	10,75
80G7	G7	80	0,525	13,56	3,63	20,5
90G7	G7	90	0,502	13,49	3,28	76,63
0G8	G8	0	0,478	13,50	9,17	84,13
10G8	G8	10	0,476	13,44	8,68	62,25
20G8	G8	20	0,461	12,64	9,60	68,75
30G8	G8	30	0,481	13,54	7,22	59
45G8	G8	45	0,488	13,40	6,00	16
60G8	G8	60	0,465	13,18	4,61	15,13
70G8	G8	70	0,471	13,42	4,30	49
80G8	G8	80	0,471	13,62	3,95	30,88
90G8	G8	90	0,467	12,73	4,14	59,25

Tabela 22 – Resultados do ensaio de cisalhamento à torção das juntas coladas com adesivo poliuretano

Corpo de Prova	Grupo	Ângulo	d (g.cm^{-3})	U (%)	fv0 12% (MPa)	Falha na madeira (%)
0G1	G1	0	0,644	12,02	8,76	72
10G1	G1	10	0,641	13,55	9,29	37,13
20G1	G1	20	0,625	12,45	8,47	18
30G1	G1	30	0,645	12,00	9,60	29,5
45G1	G1	45	0,674	13,09	8,97	10,13
60G1	G1	60	0,636	12,33	6,37	11,88
70G1	G1	70	0,634	13,29	6,41	6,38
80G1	G1	80	0,650	13,27	6,24	5,25
90G1	G1	90	0,650	13,46	6,31	12
0G2	G2	0	0,628	13,35	8,79	10,13
10G2	G2	10	0,624	11,86	8,69	29,88
20G2	G2	20	0,617	13,58	6,74	34,88
30G2	G2	30	0,643	13,78	7,60	12,5
45G2	G2	45	0,602	12,25	7,14	28
60G2	G2	60	0,630	13,34	6,84	9,63
70G2	G2	70	0,627	13,16	5,20	5,38
80G2	G2	80	0,619	12,06	8,73	39,13
90G2	G2	90	0,599	13,24	6,29	4,5
0G3	G3	0	0,581	11,79	7,33	28,88
10G3	G3	10	0,590	12,10	8,47	45
20G3	G3	20	0,591	11,80	9,61	39,38
30G3	G3	30	0,585	12,45	7,01	40
45G3	G3	45	0,596	13,09	8,54	3,88
60G3	G3	60	0,611	12,55	7,71	23,38
70G3	G3	70	0,619	11,99	6,97	21
80G3	G3	80	0,576	12,23	5,16	49,5
90G3	G3	90	0,597	13,68	6,19	37,5
0G4	G4	0	0,549	13,32	5,78	2,38
10G4	G4	10	0,575	13,23	6,52	25,5
20G4	G4	20	0,577	13,16	7,13	37,25
30G4	G4	30	0,578	13,01	8,41	23,25
45G4	G4	45	0,564	12,26	8,51	42,38
60G4	G4	60	0,582	13,35	6,21	2,63
70G4	G4	70	0,607	13,61	5,43	14,13
80G4	G4	80	0,568	13,30	6,93	37,63
90G4	G4	90	0,579	12,28	5,73	14,88
0G5	G5	0	0,530	12,85	7,39	95,5
10G5	G5	10	0,549	13,43	6,74	14,25
20G5	G5	20	0,554	12,26	8,12	55,88
30G5	G5	30	0,551	12,46	7,72	40,63

Continuação da Tabela 22

Corpo de Prova	Grupo	Ângulo	d (g.cm^{-3})	U (%)	fv0 12% (MPa)	Falha na madeira (%)
45G5	G5	45	0,546	13,17	8,41	33,13
60G5	G5	60	0,533	12,45	6,82	40,75
70G5	G5	70	0,565	12,07	6,38	2,88
80G5	G5	80	0,559	13,29	6,12	46,63
90G5	G5	90	0,576	12,56	6,44	9,5
0G6	G6	0	0,521	13,50	7,50	38,25
10G6	G6	10	0,518	12,30	7,48	56,25
20G6	G6	20	0,524	13,04	7,43	34
30G6	G6	30	0,535	13,46	8,47	26,25
45G6	G6	45	0,522	12,75	7,39	81,13
60G6	G6	60	0,523	13,58	7,33	36,88
70G6	G6	70	0,523	13,78	7,16	37,75
80G6	G6	80	0,557	11,89	5,84	12,38
90G6	G6	90	0,559	13,51	5,27	39,88
0G7	G7	0	0,520	13,43	7,37	18,88
10G7	G7	10	0,472	11,45	6,66	75
20G7	G7	20	0,486	13,27	5,30	35,5
30G7	G7	30	0,530	13,88	7,43	19,5
45G7	G7	45	0,512	13,59	5,05	29,13
60G7	G7	60	0,520	13,69	6,28	21,13
70G7	G7	70	0,489	12,62	6,12	57,63
80G7	G7	80	0,525	14,12	5,25	7,75
90G7	G7	90	0,525	11,58	5,82	31,63
0G8	G8	0	0,486	11,84	6,43	79,75
10G8	G8	10	0,466	13,75	8,81	34,25
20G8	G8	20	0,473	11,64	6,53	69,5
30G8	G8	30	0,482	11,64	7,00	72
45G8	G8	45	0,469	11,84	5,85	57,63
60G8	G8	60	0,505	12,30	5,54	67
70G8	G8	70	0,462	11,91	5,40	68,13
80G8	G8	80	0,491	11,79	4,39	49,13
90G8	G8	90	0,501	12,00	6,53	21,63

APÊNDICE B

Tabela 23 - Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão das juntas coladas com adesivo epóxi

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
2T11.1	1	1	0,6	80	0,679	Diagonal	16,50	14,45
2T11.2	1	2	0,6	80	0,662	Diagonal	16,73	16,45
2T11.3	1	3	0,6	80	0,661	Diagonal	15,68	13,27
1T11.1	2	1	0,6	80	0,664	Radial	13,23	11,27
1T11.2	2	2	0,6	80	0,667	Radial	13,63	13,10
1T11.3	2	3	0,6	80	0,656	Radial	13,00	12,43
3T11.1	3	1	0,6	80	0,644	Diagonal	12,73	12,04
3T11.2	3	2	0,6	80	0,649	Diagonal	14,21	14,00
3T11.3	3	3	0,6	80	0,641	Diagonal	13,88	11,27
4T11.1	4	1	0,6	80	0,590	Diagonal	12,86	14,32
4T11.2	4	2	0,6	80	0,585	Diagonal	13,11	13,14
4T11.3	4	3	0,6	80	0,580	Diagonal	13,16	12,92
5T11.1	5	1	0,6	80	0,584	Diagonal	12,97	11,57
5T11.2	5	2	0,6	80	0,570	Diagonal	11,83	10,30
5T11.3	5	3	0,6	80	0,569	Diagonal	13,07	11,20
6T11.1	6	1	0,6	80	0,506	Diagonal	13,79	9,78
6T11.2	6	2	0,6	80	0,508	Diagonal	8,38	10,25
6T11.3	6	3	0,6	80	0,508	Diagonal	14,95	11,56
1T12.1	1	1	0,6	150	0,672	Diagonal	12,56	14,01
1T12.2	1	2	0,6	150	0,663	Diagonal	12,75	14,42
1T12.3	1	3	0,6	150	0,661	Diagonal	12,90	14,39
2T12.1	2	1	0,6	150	0,666	Diagonal	16,08	15,91
2T12.2	2	2	0,6	150	0,664	Diagonal	16,44	15,59
2T12.3	2	3	0,6	150	0,663	Diagonal	16,59	16,05
4T12.1	3	1	0,6	150	0,595	Diagonal	13,18	10,54
4T12.2	3	2	0,6	150	0,601	Diagonal	12,89	14,20
4T12.3	3	3	0,6	150	0,598	Diagonal	12,97	15,06
3T12.1	4	1	0,6	150	0,600	Tangencial	15,09	15,30
3T12.2	4	2	0,6	150	0,598	Tangencial	14,47	14,76
3T12.3	4	3	0,6	150	0,590	Tangencial	14,77	15,54
5T12.1	5	1	0,6	150	0,560	Diagonal	13,55	12,07
5T12.2	5	2	0,6	150	0,562	Diagonal	13,45	11,78
5T12.3	5	3	0,6	150	0,559	Diagonal	13,94	12,19
6T12.1	6	1	0,6	150	0,513	Diagonal	11,48	12,67
6T12.2	6	2	0,6	150	0,514	Diagonal	11,69	14,76
6T12.3	6	3	0,6	150	0,514	Diagonal	12,06	13,12
2T13.1	1	1	0,6	200	0,698	Diagonal	14,19	15,29

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
2T13.2	1	2	0,6	200	0,704	Diagonal	13,42	17,27
2T13.3	1	3	0,6	200	0,705	Diagonal	15,46	17,55
1T13.1	2	1	0,6	200	0,654	Diagonal	13,14	15,49
1T13.2	2	2	0,6	200	0,656	Diagonal	12,99	15,75
1T13.3	2	3	0,6	200	0,683	Diagonal	12,93	14,34
3T13.1	3	1	0,6	200	0,622	Diagonal	14,38	14,07
3T13.2	3	2	0,6	200	0,613	Diagonal	12,88	12,21
3T13.3	3	3	0,6	200	0,611	Diagonal	13,09	11,03
4T13.1	4	1	0,6	200	0,584	Diagonal	13,82	15,01
4T13.2	4	2	0,6	200	0,582	Diagonal	13,60	14,07
4T13.3	4	3	0,6	200	0,581	Diagonal	13,47	12,99
5T13.1	5	1	0,6	200	0,564	Diagonal	13,38	9,64
5T13.2	5	2	0,6	200	0,563	Diagonal	13,41	11,21
5T13.3	5	3	0,6	200	0,561	Diagonal	12,96	12,55
6T13.1	6	1	0,6	200	0,544	Diagonal	13,87	14,52
6T13.2	6	2	0,6	200	0,547	Diagonal	11,67	13,81
6T13.3	6	3	0,6	200	0,558	Diagonal	12,39	13,69
1T14.1	1	1	0,6	250	0,757	Radial	13,58	13,02
1T14.2	1	2	0,6	250	0,751	Radial	13,46	16,13
1T14.3	1	3	0,6	250	0,743	Radial	13,24	13,91
2T14.1	2	1	0,6	250	0,660	Diagonal	16,64	14,83
2T14.2	2	2	0,6	250	0,651	Diagonal	14,43	14,47
2T14.3	2	3	0,6	250	0,648	Diagonal	16,49	15,28
3T14.1	3	1	0,6	250	0,621	Diagonal	13,94	14,00
3T14.2	3	2	0,6	250	0,619	Diagonal	14,35	14,60
3T14.3	3	3	0,6	250	0,615	Diagonal	18,73	14,37
4T14.1	4	1	0,6	250	0,575	Diagonal	12,86	12,28
4T14.2	4	2	0,6	250	0,577	Diagonal	12,95	12,45
4T14.3	4	3	0,6	250	0,578	Diagonal	13,09	10,40
5T14.1	5	1	0,6	250	0,573	Diagonal	12,13	12,42
5T14.2	5	2	0,6	250	0,572	Diagonal	13,38	12,11
5T14.3	5	3	0,6	250	0,568	Diagonal	13,53	13,08
6T14.1	6	1	0,6	250	0,494	Diagonal	10,95	10,18
6T14.2	6	2	0,6	250	0,496	Diagonal	10,90	11,09
6T14.3	6	3	0,6	250	0,492	Diagonal	12,88	12,18
1T15.1	1	1	0,6	300	0,741	Diagonal	13,51	13,87
1T15.2	1	2	0,6	300	0,705	Diagonal	13,05	16,72
1T15.3	1	3	0,6	300	0,710	Diagonal	12,65	14,56
2T15.1	2	1	0,6	300	0,663	Diagonal	13,85	16,76
2T15.2	2	2	0,6	300	0,661	Diagonal	15,22	17,93
2T15.3	2	3	0,6	300	0,663	Diagonal	16,61	17,76
3T15.1	3	1	0,6	300	0,633	Diagonal	13,49	15,67

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
3T15.2	3	2	0,6	300	0,626	Diagonal	15,24	15,07
3T15.3	3	3	0,6	300	0,629	Diagonal	14,65	14,94
4T15.1	4	1	0,6	300	0,590	Diagonal	13,17	11,59
4T15.2	4	2	0,6	300	0,584	Diagonal	13,27	12,30
4T15.3	4	3	0,6	300	0,583	Diagonal	13,19	13,92
6T15.1	5	1	0,6	300	0,574	Diagonal	11,07	10,26
6T15.2	5	2	0,6	300	0,578	Diagonal	13,73	11,72
6T15.3	5	3	0,6	300	0,571	Diagonal	14,66	13,71
5T15.1	6	1	0,6	300	0,575	Diagonal	12,76	12,26
5T15.2	6	2	0,6	300	0,559	Diagonal	12,86	11,76
5T15.3	6	3	0,6	300	0,554	Diagonal	12,96	10,83
1T16.1	1	1	0,6	350	0,725	Diagonal	13,49	15,58
1T16.2	1	2	0,6	350	0,732	Diagonal	13,47	16,03
1T16.3	1	3	0,6	350	0,731	Diagonal	13,23	15,33
3T16.1	2	1	0,6	350	0,651	Diagonal	14,19	13,89
3T16.2	2	2	0,6	350	0,649	Diagonal	13,58	13,81
3T16.3	2	3	0,6	350	0,650	Diagonal	13,56	14,31
2T16.1	3	1	0,6	350	0,648	Diagonal	17,12	17,26
2T16.2	3	2	0,6	350	0,651	Diagonal	17,14	17,25
2T16.3	3	3	0,6	350	0,648	Diagonal	17,08	15,12
4T16.1	4	1	0,6	350	0,558	Diagonal	13,20	11,98
4T16.2	4	2	0,6	350	0,561	Diagonal	13,29	13,73
4T16.3	4	3	0,6	350	0,568	Diagonal	13,21	10,93
5T16.1	5	1	0,6	350	0,547	Diagonal	13,93	11,51
5T16.2	5	2	0,6	350	0,538	Diagonal	13,94	12,99
5T16.3	5	3	0,6	350	0,543	Diagonal	12,73	11,59
6T16.1	6	1	0,6	350	0,535	Diagonal	13,23	13,11
6T16.2	6	2	0,6	350	0,541	Diagonal	12,12	13,82
6T16.3	6	3	0,6	350	0,545	Diagonal	13,80	14,39
1T21.1	1	1	0,8	80	0,682	Diagonal	13,70	12,98
1T21.2	1	2	0,8	80	0,669	Diagonal	13,45	14,00
1T21.3	1	3	0,8	80	0,671	Diagonal	12,97	11,95
2T21.1	2	1	0,8	80	0,638	Diagonal	12,36	14,73
2T21.2	2	2	0,8	80	0,640	Diagonal	16,00	14,64
2T21.3	2	3	0,8	80	0,624	Diagonal	15,64	12,83
3T21.1	3	1	0,8	80	0,613	Diagonal	13,27	15,17
3T21.2	3	2	0,8	80	0,612	Diagonal	14,25	15,00
3T21.3	3	3	0,8	80	0,603	Diagonal	15,20	14,15
4T21.1	4	1	0,8	80	0,593	Diagonal	13,19	12,25
4T21.2	4	2	0,8	80	0,587	Diagonal	13,53	11,09
4T21.3	4	3	0,8	80	0,593	Diagonal	13,24	11,07
5T21.1	5	1	0,8	80	0,592	Tangencial	13,29	12,15

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
5T21.2	5	2	0,8	80	0,583	Tangencial	13,11	12,81
5T21.3	5	3	0,8	80	0,585	Tangencial	12,45	11,33
6T21.1	6	1	0,8	80	0,492	Diagonal	10,24	12,89
6T21.2	6	2	0,8	80	0,485	Diagonal	12,94	13,65
6T21.3	6	3	0,8	80	0,483	Diagonal	13,49	14,77
1T22.1	1	1	0,8	150	0,736	Diagonal	12,77	15,32
1T22.2	1	2	0,8	150	0,733	Diagonal	12,99	12,67
1T22.3	1	3	0,8	150	0,743	Diagonal	12,87	14,66
2T22.1	2	1	0,8	150	0,636	Diagonal	16,07	12,79
2T22.2	2	2	0,8	150	0,638	Diagonal	13,41	10,68
2T22.3	2	3	0,8	150	0,644	Diagonal	12,45	13,02
3T22.1	3	1	0,8	150	0,628	Diagonal	13,93	14,32
3T22.2	3	2	0,8	150	0,627	Diagonal	13,09	14,16
3T22.3	3	3	0,8	150	0,628	Diagonal	14,06	12,78
5T22.1	4	1	0,8	150	0,601	Radial	13,35	11,38
5T22.2	4	2	0,8	150	0,598	Radial	12,35	12,61
5T22.3	4	3	0,8	150	0,598	Radial	11,79	13,00
4T22.1	5	1	0,8	150	0,601	Diagonal	13,01	12,79
4T22.2	5	2	0,8	150	0,595	Diagonal	12,37	13,21
4T22.3	5	3	0,8	150	0,589	Diagonal	12,83	14,10
6T22.1	6	1	0,8	150	0,546	Diagonal	12,46	12,55
6T22.2	6	2	0,8	150	0,554	Diagonal	12,84	13,43
6T22.3	6	3	0,8	150	0,556	Diagonal	13,31	12,43
2T23.1	1	1	0,8	200	0,640	Diagonal	9,63	11,92
2T23.2	1	2	0,8	200	0,639	Diagonal	14,64	11,88
2T23.3	1	3	0,8	200	0,637	Diagonal	16,23	13,02
1T23.1	2	1	0,8	200	0,635	Diagonal	13,24	11,85
1T23.2	2	2	0,8	200	0,637	Diagonal	13,25	13,26
1T23.3	2	3	0,8	200	0,639	Diagonal	13,03	14,70
4T23.1	3	1	0,8	200	0,608	Diagonal	13,40	12,88
4T23.2	3	2	0,8	200	0,606	Diagonal	14,01	12,57
4T23.3	3	3	0,8	200	0,598	Diagonal	13,22	14,02
3T23.1	4	1	0,8	200	0,608	Diagonal	14,85	14,80
3T23.2	4	2	0,8	200	0,606	Diagonal	13,81	14,40
3T23.3	4	3	0,8	200	0,645	Diagonal	14,14	12,48
5T23.1	5	1	0,8	200	0,592	Diagonal	13,42	12,44
5T23.2	5	2	0,8	200	0,581	Diagonal	13,52	13,13
5T23.3	5	3	0,8	200	0,577	Diagonal	12,79	12,18
6T23.1	6	1	0,8	200	0,536	Diagonal	11,64	11,72
6T23.2	6	2	0,8	200	0,526	Diagonal	10,96	12,14
6T23.3	6	3	0,8	200	0,514	Diagonal	13,71	13,20
1T24.1	1	1	0,8	250	0,684	Diagonal	13,25	11,60

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
1T24.2	1	2	0,8	250	0,695	Diagonal	13,38	14,50
1T24.3	1	3	0,8	250	0,696	Diagonal	13,77	11,98
3T24.1	2	1	0,8	250	0,639	Diagonal	13,93	13,28
3T24.2	2	2	0,8	250	0,631	Diagonal	14,08	15,71
3T24.3	2	3	0,8	250	0,634	Diagonal	14,31	13,71
2T24.1	3	1	0,8	250	0,641	Tangencial	14,36	13,46
2T24.2	3	2	0,8	250	0,628	Tangencial	17,14	12,88
2T24.3	3	3	0,8	250	0,630	Tangencial	17,44	15,48
4T24.1	4	1	0,8	250	0,577	Diagonal	13,00	11,16
4T24.2	4	2	0,8	250	0,578	Diagonal	13,15	11,82
4T24.3	4	3	0,8	250	0,580	Diagonal	13,30	17,33
5T24.1	5	1	0,8	250	0,577	Diagonal	11,42	13,06
5T24.2	5	2	0,8	250	0,558	Diagonal	12,76	13,96
5T24.3	5	3	0,8	250	0,544	Diagonal	12,50	10,61
6T24.1	6	1	0,8	250	0,511	Diagonal	11,08	13,32
6T24.2	6	2	0,8	250	0,519	Diagonal	13,63	14,67
6T24.3	6	3	0,8	250	0,521	Diagonal	10,89	12,72
1T25.1	1	1	0,8	300	0,740	Diagonal	13,04	14,03
1T25.2	1	2	0,8	300	0,740	Diagonal	12,89	12,64
1T25.3	1	3	0,8	300	0,747	Diagonal	13,09	13,89
2T25.1	2	1	0,8	300	0,630	Diagonal	16,98	15,09
2T25.2	2	2	0,8	300	0,644	Diagonal	12,94	11,79
2T25.3	2	3	0,8	300	0,619	Diagonal	12,79	12,36
3T25.1	3	1	0,8	300	0,611	Diagonal	13,88	12,25
3T25.2	3	2	0,8	300	0,610	Diagonal	12,87	14,10
3T25.3	3	3	0,8	300	0,614	Diagonal	13,69	13,62
4T25.1	4	1	0,8	300	0,552	Diagonal	13,83	14,24
4T25.2	4	2	0,8	300	0,562	Diagonal	13,33	14,40
4T25.3	4	3	0,8	300	0,574	Diagonal	13,25	13,69
5T25.1	5	1	0,8	300	0,516	Tangencial	13,49	14,20
5T25.2	5	2	0,8	300	0,514	Tangencial	13,89	13,48
5T25.3	5	3	0,8	300	0,519	Tangencial	13,47	10,36
6T25.1	6	1	0,8	300	0,494	Tangencial	11,87	17,85
6T25.2	6	2	0,8	300	0,489	Tangencial	13,63	15,57
6T25.3	6	3	0,8	300	0,492	Tangencial	12,20	13,03
1T26.1	1	1	0,8	350	0,704	Diagonal	13,21	12,65
1T26.2	1	2	0,8	350	0,745	Diagonal	12,80	12,54
1T26.3	1	3	0,8	350	0,701	Diagonal	13,49	13,43
2T26.1	2	1	0,8	350	0,672	Diagonal	13,81	13,91
2T26.2	2	2	0,8	350	0,670	Diagonal	13,46	13,26
2T26.3	2	3	0,8	350	0,668	Diagonal	13,08	12,28
4T26.1	3	1	0,8	350	0,653	Diagonal	12,81	13,39

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
4T26.2	3	2	0,8	350	0,637	Diagonal	13,13	14,40
4T26.3	3	3	0,8	350	0,640	Diagonal	13,06	14,04
3T26.1	4	1	0,8	350	0,618	Diagonal	13,45	15,20
3T26.2	4	2	0,8	350	0,613	Diagonal	14,35	12,67
3T26.3	4	3	0,8	350	0,620	Diagonal	14,31	12,85
5T26.1	5	1	0,8	350	0,545	Diagonal	12,31	12,72
5T26.2	5	2	0,8	350	0,545	Diagonal	13,05	11,71
5T26.3	5	3	0,8	350	0,555	Diagonal	13,81	12,72
6T26.1	6	1	0,8	350	0,485	Diagonal	14,17	14,54
6T26.2	6	2	0,8	350	0,480	Diagonal	12,85	13,56
6T26.3	6	3	0,8	350	0,480	Diagonal	12,83	11,98
1T31.1	1	1	1	80	0,690	Diagonal	13,19	12,49
1T31.2	1	2	1	80	0,682	Diagonal	12,90	15,31
1T31.3	1	3	1	80	0,681	Diagonal	13,04	13,91
2T31.1	2	1	1	80	0,647	Diagonal	15,85	14,31
2T31.2	2	2	1	80	0,648	Diagonal	16,67	15,30
2T31.3	2	3	1	80	0,649	Diagonal	16,53	14,51
3T31.1	3	1	1	80	0,635	Diagonal	13,45	10,36
3T31.2	3	2	1	80	0,633	Diagonal	13,17	13,34
3T31.3	3	3	1	80	0,632	Diagonal	14,11	11,38
4T31.1	4	1	1	80	0,573	Diagonal	12,93	13,06
4T31.2	4	2	1	80	0,578	Diagonal	13,09	11,84
4T31.3	4	3	1	80	0,581	Diagonal	12,84	12,05
5T31.1	5	1	1	80	0,552	Diagonal	12,87	11,33
5T31.2	5	2	1	80	0,551	Diagonal	12,21	11,02
5T31.3	5	3	1	80	0,545	Diagonal	13,54	10,77
6T31.1	6	1	1	80	0,551	Diagonal	13,13	15,02
6T31.2	6	2	1	80	0,546	Diagonal	13,60	17,10
6T31.3	6	3	1	80	0,547	Diagonal	13,52	15,16
1T32.1	1	1	1	150	0,693	Diagonal	13,25	14,72
1T32.2	1	2	1	150	0,697	Diagonal	10,72	12,92
1T32.3	1	3	1	150	0,695	Diagonal	13,12	14,15
3T32.1	2	1	1	150	0,644	Diagonal	12,99	13,62
3T32.2	2	2	1	150	0,653	Diagonal	12,05	13,71
3T32.3	2	3	1	150	0,670	Diagonal	14,14	12,75
2T32.1	3	1	1	150	0,659	Diagonal	15,91	14,18
2T32.2	3	2	1	150	0,642	Diagonal	15,94	14,20
2T32.3	3	3	1	150	0,652	Diagonal	12,92	12,03
4T32.1	4	1	1	150	0,608	Diagonal	13,50	12,67
4T32.2	4	2	1	150	0,622	Diagonal	13,06	12,88
4T32.3	4	3	1	150	0,637	Diagonal	13,29	14,28
5T32.1	5	1	1	150	0,567	Diagonal	13,96	11,09

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
5T32.2	5	2	1	150	0,563	Diagonal	13,79	10,91
5T32.3	5	3	1	150	0,565	Diagonal	13,97	11,38
6T32.1	6	1	1	150	0,530	Diagonal	14,28	13,19
6T32.2	6	2	1	150	0,529	Diagonal	13,60	13,20
6T32.3	6	3	1	150	0,525	Diagonal	11,82	14,83
1T33.1	1	1	1	200	0,693	Diagonal	13,24	12,02
1T33.2	1	2	1	200	0,712	Diagonal	13,33	14,03
1T33.3	1	3	1	200	0,724	Diagonal	13,52	13,23
2T33.1	2	1	1	200	0,648	Diagonal	16,29	13,33
2T33.2	2	2	1	200	0,663	Diagonal	17,10	13,23
2T33.3	2	3	1	200	0,667	Diagonal	16,35	14,11
3T33.1	3	1	1	200	0,620	Diagonal	13,15	12,63
3T33.2	3	2	1	200	0,612	Diagonal	13,34	12,89
3T33.3	3	3	1	200	0,612	Diagonal	12,65	13,74
4T33.1	4	1	1	200	0,581	Diagonal	12,84	13,98
4T33.2	4	2	1	200	0,606	Diagonal	13,51	13,29
4T33.3	4	3	1	200	0,626	Diagonal	13,05	14,64
5T33.1	5	1	1	200	0,606	Diagonal	13,36	14,02
5T33.2	5	2	1	200	0,606	Diagonal	12,57	11,86
5T33.3	5	3	1	200	0,607	Diagonal	13,29	9,74
6T33.1	6	1	1	200	0,521	Diagonal	13,33	14,89
6T33.2	6	2	1	200	0,518	Diagonal	11,76	12,74
6T33.3	6	3	1	200	0,521	Diagonal	13,17	15,06
1T34.1	1	1	1	250	0,735	Diagonal	13,34	13,06
1T34.2	1	2	1	250	0,739	Diagonal	13,00	15,52
1T34.3	1	3	1	250	0,725	Diagonal	13,18	13,85
2T34.1	2	1	1	250	0,647	Radial	15,86	14,51
2T34.2	2	2	1	250	0,634	Radial	14,38	12,95
2T34.3	2	3	1	250	0,655	Radial	14,79	13,87
3T34.1	3	1	1	250	0,634	Diagonal	14,37	15,27
3T34.2	3	2	1	250	0,635	Diagonal	12,67	15,07
3T34.3	3	3	1	250	0,637	Diagonal	14,62	15,09
5T34.1	4	1	1	250	0,608	Diagonal	13,84	14,82
5T34.2	4	2	1	250	0,606	Diagonal	12,40	10,03
5T34.3	4	3	1	250	0,600	Diagonal	13,03	11,28
4T34.1	5	1	1	250	0,584	Diagonal	13,24	14,00
4T34.2	5	2	1	250	0,578	Diagonal	13,06	14,72
4T34.3	5	3	1	250	0,583	Diagonal	12,43	13,83
6T34.1	6	1	1	250	0,515	Diagonal	12,48	12,83
6T34.2	6	2	1	250	0,520	Diagonal	11,86	13,65
6T34.3	6	3	1	250	0,523	Diagonal	12,43	13,86
1T35.1	1	1	1	300	0,696	Diagonal	13,01	12,10

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
1T35.2	1	2	1	300	0,719	Diagonal	13,35	14,11
1T35.3	1	3	1	300	0,688	Diagonal	13,30	12,57
2T35.1	2	1	1	300	0,656	Tangencial	15,20	15,79
2T35.2	2	2	1	300	0,653	Tangencial	15,42	15,44
2T35.3	2	3	1	300	0,652	Tangencial	16,22	14,16
3T35.1	3	1	1	300	0,604	Diagonal	14,36	14,37
3T35.2	3	2	1	300	0,600	Diagonal	14,74	13,75
3T35.3	3	3	1	300	0,598	Diagonal	13,97	12,19
4T35.1	4	1	1	300	0,587	Diagonal	12,98	11,66
4T35.2	4	2	1	300	0,593	Diagonal	13,26	11,57
4T35.3	4	3	1	300	0,588	Diagonal	13,29	13,97
5T35.1	5	1	1	300	0,573	Diagonal	12,11	11,10
5T35.2	5	2	1	300	0,571	Diagonal	13,15	11,63
5T35.3	5	3	1	300	0,573	Diagonal	12,70	12,40
6T35.1	6	1	1	300	0,512	Diagonal	12,55	13,00
6T35.2	6	2	1	300	0,514	Diagonal	13,60	13,18
6T35.3	6	3	1	300	0,517	Diagonal	13,09	13,76
1T36.1	1	1	1	350	0,693	Diagonal	12,89	13,41
1T36.2	1	2	1	350	0,683	Diagonal	13,24	14,87
1T36.3	1	3	1	350	0,684	Diagonal	13,14	13,13
2T36.1	2	1	1	350	0,644	Diagonal	17,15	14,25
2T36.2	2	2	1	350	0,640	Diagonal	14,56	14,41
2T36.3	2	3	1	350	0,635	Diagonal	16,55	15,38
3T36.1	3	1	1	350	0,600	Diagonal	14,16	14,30
3T36.2	3	2	1	350	0,605	Diagonal	13,18	13,06
3T36.3	3	3	1	350	0,604	Diagonal	13,79	11,86
4T36.1	4	1	1	350	0,575	Diagonal	12,93	13,66
4T36.2	4	2	1	350	0,583	Diagonal	13,38	17,23
4T36.3	4	3	1	350	0,578	Diagonal	13,78	15,08
5T36.1	5	1	1	350	0,548	Diagonal	13,21	9,61
5T36.2	5	2	1	350	0,549	Diagonal	13,33	11,23
5T36.3	5	3	1	350	0,562	Diagonal	13,52	10,57
6T36.1	6	1	1	350	0,552	Diagonal	13,18	14,59
6T36.2	6	2	1	350	0,549	Diagonal	13,66	14,27
6T36.3	6	3	1	350	0,538	Diagonal	13,32	13,15
1T41.1	1	1	1,2	80	0,686	Diagonal	13,16	8,93
1T41.2	1	2	1,2	80	0,676	Diagonal	12,45	7,51
1T41.3	1	3	1,2	80	0,687	Diagonal	12,17	9,59
2T41.1	2	1	1,2	80	0,650	Diagonal	12,68	9,99
2T41.2	2	2	1,2	80	0,656	Diagonal	16,09	13,61
2T41.3	2	3	1,2	80	0,656	Diagonal	16,20	13,55
3T41.1	3	1	1,2	80	0,601	Diagonal	12,81	8,28

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
3T41.2	3	2	1,2	80	0,600	Diagonal	13,08	13,32
3T41.3	3	3	1,2	80	0,595	Diagonal	13,11	11,42
5T41.1	4	1	1,2	80	0,578	Diagonal	13,34	10,52
5T41.2	4	2	1,2	80	0,582	Diagonal	12,65	11,51
5T41.3	4	3	1,2	80	0,579	Diagonal	13,38	12,38
4T41.1	5	1	1,2	80	0,517	Tangencial	12,46	11,38
4T41.2	5	2	1,2	80	0,523	Tangencial	12,85	11,55
4T41.3	5	3	1,2	80	0,544	Tangencial	13,28	11,77
6T41.1	6	1	1,2	80	0,507	Diagonal	13,96	11,60
6T41.2	6	2	1,2	80	0,501	Diagonal	14,22	10,80
6T41.3	6	3	1,2	80	0,501	Diagonal	13,83	11,96
1T42.1	1	1	1,2	150	0,690	Diagonal	13,17	13,91
1T42.2	1	2	1,2	150	0,687	Diagonal	12,35	12,30
1T42.3	1	3	1,2	150	0,686	Diagonal	12,81	10,67
2T42.1	2	1	1,2	150	0,665	Diagonal	16,73	17,35
2T42.2	2	2	1,2	150	0,651	Diagonal	17,18	15,26
2T42.3	2	3	1,2	150	0,641	Diagonal	16,67	15,34
3T42.1	3	1	1,2	150	0,637	Diagonal	14,13	13,03
3T42.2	3	2	1,2	150	0,630	Diagonal	13,92	13,89
3T42.3	3	3	1,2	150	0,626	Diagonal	14,13	13,00
5T42.1	4	1	1,2	150	0,578	Diagonal	12,05	12,81
5T42.2	4	2	1,2	150	0,585	Diagonal	11,72	12,85
5T42.3	4	3	1,2	150	0,590	Diagonal	13,13	12,43
4T42.1	5	1	1,2	150	0,568	Diagonal	12,99	16,37
4T42.2	5	2	1,2	150	0,582	Diagonal	12,73	13,95
4T42.3	5	3	1,2	150	0,574	Diagonal	12,61	12,88
6T42.1	6	1	1,2	150	0,531	Diagonal	11,10	10,53
6T42.2	6	2	1,2	150	0,540	Diagonal	13,42	12,06
6T42.3	6	3	1,2	150	0,540	Diagonal	13,92	10,59
1T43.1	1	1	1,2	200	0,705	Radial	13,37	14,03
1T43.2	1	2	1,2	200	0,704	Radial	13,35	13,25
1T43.3	1	3	1,2	200	0,695	Radial	13,16	12,85
2T43.1	2	1	1,2	200	0,634	Diagonal	16,24	13,22
2T43.2	2	2	1,2	200	0,630	Diagonal	15,77	14,48
2T43.3	2	3	1,2	200	0,626	Diagonal	16,64	14,51
3T43.1	3	1	1,2	200	0,621	Diagonal	13,36	10,78
3T43.2	3	2	1,2	200	0,622	Diagonal	12,90	12,77
3T43.3	3	3	1,2	200	0,621	Diagonal	12,62	12,59
4T43.1	4	1	1,2	200	0,604	Diagonal	13,29	14,23
4T43.2	4	2	1,2	200	0,606	Diagonal	13,40	10,76
4T43.3	4	3	1,2	200	0,613	Diagonal	12,88	13,21
5T43.1	5	1	1,2	200	0,537	Radial	13,04	10,43

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
5T43.2	5	2	1,2	200	0,552	Radial	13,26	10,92
5T43.3	5	3	1,2	200	0,535	Radial	13,43	9,17
6T43.1	6	1	1,2	200	0,497	Diagonal	11,70	13,67
6T43.2	6	2	1,2	200	0,491	Diagonal	14,03	12,14
6T43.3	6	3	1,2	200	0,491	Diagonal	7,26	9,73
1T44.1	1	1	1,2	250	0,711	Diagonal	9,91	10,53
1T44.2	1	2	1,2	250	0,705	Diagonal	13,11	11,28
1T44.3	1	3	1,2	250	0,705	Diagonal	12,95	10,11
2T44.1	2	1	1,2	250	0,633	Diagonal	16,03	10,98
2T44.2	2	2	1,2	250	0,653	Diagonal	15,96	12,05
2T44.3	2	3	1,2	250	0,655	Diagonal	16,83	13,61
3T44.1	3	1	1,2	250	0,624	Diagonal	15,64	11,55
3T44.2	3	2	1,2	250	0,628	Diagonal	15,61	11,69
3T44.3	3	3	1,2	250	0,617	Diagonal	13,82	12,29
5T44.1	4	1	1,2	250	0,567	Diagonal	13,17	12,62
5T44.2	4	2	1,2	250	0,568	Diagonal	12,39	11,88
5T44.3	4	3	1,2	250	0,569	Diagonal	11,39	10,96
4T44.1	5	1	1,2	250	0,570	Diagonal	12,88	11,38
4T44.2	5	2	1,2	250	0,565	Diagonal	12,89	11,84
4T44.3	5	3	1,2	250	0,565	Diagonal	12,93	11,44
6T44.1	6	1	1,2	250	0,481	Diagonal	14,03	13,10
6T44.2	6	2	1,2	250	0,481	Diagonal	12,78	10,20
6T44.3	6	3	1,2	250	0,477	Diagonal	12,36	11,39
1T45.1	1	1	1,2	300	0,738	Diagonal	12,68	12,46
1T45.2	1	2	1,2	300	0,735	Radial	13,41	14,45
1T45.3	1	3	1,2	300	0,759	Radial	13,36	12,58
2T45.1	2	1	1,2	300	0,665	Diagonal	15,48	12,12
2T45.2	2	2	1,2	300	0,666	Diagonal	15,35	13,52
2T45.3	2	3	1,2	300	0,672	Diagonal	15,13	15,49
3T45.1	3	1	1,2	300	0,619	Diagonal	13,37	13,13
3T45.2	3	2	1,2	300	0,619	Diagonal	14,10	13,07
3T45.3	3	3	1,2	300	0,626	Diagonal	13,08	12,64
4T45.1	4	1	1,2	300	0,591	Diagonal	13,32	14,49
4T45.2	4	2	1,2	300	0,577	Diagonal	13,36	11,71
4T45.3	4	3	1,2	300	0,580	Diagonal	12,85	11,33
5T45.1	5	1	1,2	300	0,558	Radial	13,46	11,68
5T45.2	5	2	1,2	300	0,561	Radial	13,06	11,14
5T45.3	5	3	1,2	300	0,566	Radial	12,83	10,21
6T45.1	6	1	1,2	300	0,504	Diagonal	12,66	14,13
6T45.2	6	2	1,2	300	0,510	Diagonal	12,16	11,70
6T45.3	6	3	1,2	300	0,518	Diagonal	12,78	12,74
1T46.1	1	1	1,2	350	0,757	Diagonal	12,87	13,33

Continuação da Tabela 23

Corpo de Prova	Grupo	Ordem	Pressão (MPa)	Consumo ($g.m^{-2}$)	d ($g.cm^{-3}$)	Fibras	U (%)	fv0 12% (MPa)
1T46.2	1	2	1,2	350	0,770	Diagonal	12,69	13,66
1T46.3	1	3	1,2	350	0,769	Diagonal	13,03	12,15
2T46.1	2	1	1,2	350	0,716	Diagonal	12,85	12,41
2T46.2	2	2	1,2	350	0,717	Diagonal	12,42	10,92
2T46.3	2	3	1,2	350	0,691	Diagonal	14,73	13,13
4T46.1	3	1	1,2	350	0,637	Diagonal	12,84	14,28
4T46.2	3	2	1,2	350	0,632	Diagonal	13,31	14,41
4T46.3	3	3	1,2	350	0,624	Diagonal	12,78	14,15
3T46.1	4	1	1,2	350	0,619	Diagonal	14,82	10,41
3T46.2	4	2	1,2	350	0,623	Diagonal	13,75	11,61
3T46.3	4	3	1,2	350	0,625	Diagonal	14,26	13,31
5T46.1	5	1	1,2	350	0,559	Diagonal	13,27	10,42
5T46.2	5	2	1,2	350	0,545	Diagonal	13,25	11,06
5T46.3	5	3	1,2	350	0,534	Diagonal	13,52	10,21
6T46.1	6	1	1,2	350	0,528	Diagonal	13,02	12,78
6T46.2	6	2	1,2	350	0,525	Diagonal	11,31	13,36
6T46.3	6	3	1,2	350	0,527	Diagonal	14,12	13,32

APENDICE C

Tabela 24 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLC de baixa densidade

Lado A				Lado B			
Força 1 (kN)	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**	**Força 1 (kN)**	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**
0	0	0	0	0	0	0	0
40	38	11,86	0,13	40	39	12,8	0,157
80	82	26,44	0,284	80	77	26,06	0,313
110	117	38,77	0,42	110	107	37,04	0,446
40	38	11,99	0,135	40	40	13,12	0,163
80	81	26,52	0,287	80	83	27,22	0,328
110	114	37,77	0,406	110	115	38,07	0,457

Tabela 25 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLCA de baixa densidade

Lado A				Lado B			
Força 1 (kN)	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**	**Força 1 (kN)**	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**
0	0	0	0	0	0	0	0
40	39	1,99	0,024	40	40	1,59	0,024
81	81	4,23	0,049	80	83	3,82	0,049
122	123	6,45	0,074	119	127	6,04	0,075
40	39	1,87	0,024	46	46	2,01	0,027
81	80	4,04	0,049	81	84	3,91	0,049
121	121	5,35	0,08	123	130	6,15	0,075

Tabela 26 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLC de média densidade

Lado A				Lado B			
Força 1 (kN)	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**	**Força 1 (kN)**	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**
0	0	0	0	0	0	0	0
40	39	11,44	0,147	41	40	11,98	0,137
79	82	25,32	0,306	80	80	25,4	0,279
110	118	37,5	0,445	110	110	36,36	0,399
40	39	11,37	0,147	40	38	11,49	0,133
82	86	26,55	0,32	80	81	25,19	0,279
110	116	36,77	0,437	110	110	35,29	0,386

Tabela 27 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLCA de média densidade

Lado A				Lado B			
Força 1 (kN)	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**	**Força 1 (kN)**	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**
0	0	0	0	0	0	0	0
40	39	1,5	0,024	40	38	1,11	0,024
80	80	3,7	0,05	81	80	3,36	0,049
122	123	5,96	0,078	121	122	5,58	0,075
41	41	1,6	0,025	40	38	0,99	0,024
80	81	3,77	0,05	80	78	3,09	0,048
119	120	5,66	0,073	121	121	5,33	0,074

Tabela 28 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLC de alta densidade

Lado A				Lado B			
Força 1 (kN)	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**	**Força 1 (kN)**	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**
0	0	0	0	0	0	0	0
44	41	5,96	0,068	41	41	5,66	0,07
82	79	11,91	0,129	81	85	11,86	0,144
123	117	18,31	0,196	122	126	18,06	0,217
42	39	5,52	0,064	43	44	5,92	0,076
80	84	11,94	0,13	80	83	11,51	0,142
122	115	17,75	0,19	120	125	17,56	0,214

Tabela 29 – Resultados do ensaio à flexão para a coluna em MLCA de alta densidade

Lado A				Lado B			
Força 1 (kN)	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**	**Força 1 (kN)**	**Força 2 (kN)**	**R1 (mm)**	**R2 (mm)**
0	0	0	0	0	0	0	0
40	40	1,27	0,023	46	46	1,8	0,025
81	83	3,39	0,048	86	89	3,8	0,044
123	127	5,49	0,072	130	133	5,87	0,07
44	44	1,49	0,025	41	40	1,55	0,022
82	83	3,4	0,048	82	84	3,58	0,045
122	125	5,41	0,072	124	127	5,56	0,067

Tabela 30 – Resultados do ensaio à compressão para a coluna em MLC de baixa densidade

Força (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)
0	0	0	1
1,96	0,002	0,016	-0,12
3,92	0,006	0,032	0,34
5,88	0,006	0,053	1,81
7,85	-0,005	0,086	4,51
9,81	-0,123	0,233	11

Tabela 31 – Resultados do ensaio à compressão para a coluna em MLCA de baixa densidade

Força (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)
0	0	0	0,5
3,92	0,004	0,005	2,79
7,85	0,009	0,01	2,88
11,77	0,013	0,015	2,91
15,69	0,017	0,02	2,95
19,61	0,021	0,026	3,07
23,54	0,025	0,032	3,07
27,46	0,028	0,038	3,13
31,38	0,032	0,042	3,19
35,30	0,036	0,049	3,24
39,23	0,04	0,055	3,23

Tabela 32 – Resultados do ensaio à compressão da coluna em MLC de média densidade

Força (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)
0	0	0	1
1,96	0,011	0,003	0,81
3,92	0,018	0,01	2,42
5,88	0,026	0,017	2,53
7,85	0,034	0,024	2,61
9,81	0,042	0,031	2,63
11,77	0,05	0,038	2,64
13,73	0,059	0,045	2,64
15,69	0,069	0,052	2,69
17,65	0,078	0,057	2,69
19,61	0,088	0,063	2,69
21,57	0,099	0,067	2,62
23,54	0,112	0,069	2,33
24,52	0,119	0,07	2,04

Tabela 33 – Resultados do ensaio à compressão da coluna em MLCA de média densidade

Força (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)
0	0	0	0
3,92	0,006	0,004	2,14
7,85	0,012	0,01	2,28
11,77	0,019	0,015	2,32
15,69	0,025	0,02	2,41
19,61	0,031	0,026	2,5
23,54	0,036	0,031	2,6
27,46	0,042	0,037	2,73
31,38	0,047	0,043	2,86
35,30	0,053	0,049	2,99
39,23	0,057	0,056	3,15
43,15	0,06	0,064	3,36
47,07	0,065	0,07	3,46

Tabela 34 – Resultados do ensaio à compressão da coluna em MLC de alta densidade

Força (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)
0	0	0	1
1,96	0,003	0,003	3,1
3,92	0,006	0,007	3,15
5,88	0,01	0,011	3,22
7,85	0,013	0,015	3,3
9,81	0,017	0,018	3,34
11,77	0,021	0,022	3,34
13,73	0,024	0,025	3,42
15,69	0,028	0,029	3,42
17,65	0,032	0,033	3,42
19,61	0,035	0,037	3,43
21,57	0,038	0,041	3,43
23,54	0,042	0,045	3,45
25,50	0,048	0,052	3,55
27,46	0,051	0,056	3,66
29,42	0,054	0,06	3,67

Tabela 35 – Resultados do ensaio à compressão da coluna em MLCA de alta densidade

Força (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)
0	0	0	2
3,92	0,005	0,003	4,51
7,85	0,01	0,008	4,67
11,77	0,016	0,013	4,76
15,69	0,022	0,017	4,89
19,61	0,028	0,022	5,03
23,54	0,034	0,026	5,22
27,46	0,04	0,03	5,4
31,38	0,047	0,034	5,59
35,30	0,054	0,038	5,77
39,23	0,061	0,042	5,94
43,15	0,068	0,045	6,13
47,07	0,075	0,05	6,33