



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

FILIPE LUIGI DANTAS LIMA SANTOS

**CAVILHA DE MADEIRA REFORÇADA COM FIBRAS DE VIDRO
COMO CONECTOR EM SEÇÕES MISTAS DE MADEIRA E
CONCRETO**

Salvador
2025

FILIPE LUIGI DANTAS LIMA SANTOS

**CAVILHA DE MADEIRA REFORÇADA COM FIBRAS DE VIDRO
COMO CONECTOR EM SEÇÕES MISTAS DE MADEIRA E
CONCRETO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César

Coorientadora: Prof. Dra. Rita Dione Araújo Cunha

Agência Financiadora: CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Salvador

2025

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO

FILIPE LUIGI DANTAS LIMA SANTOS

APRESENTADA AO DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, **EM 02 DE SETEMBRO DE 2025.**

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 SANDRO FABIO CESAR
Data: 28/08/2025 21:26:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sandro Fábio César

Orientador

PPEC-UFBA

Documento assinado digitalmente
 RITA DIONE ARAUJO CUNHA
Data: 28/08/2025 21:34:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Drª. Rita Dione Araújo Cunha

Coorientadora

PPEC-UFBA

Documento assinado digitalmente
 MARCELO STROZI CILLA
Data: 03/09/2025 09:48:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Strozi Cilla

PPEC-UFBA

Documento assinado digitalmente
 JULIO CESAR MOLINA
Data: 02/09/2025 14:52:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Júlio César Molina

PPGSET-USP

Documento assinado digitalmente
 JOSE LUIZ MIOTTO
Data: 02/09/2025 19:17:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Luiz Miotto

PCV – UEM

Documento assinado digitalmente
 EDUARDO CHAHUD
Data: 02/09/2025 11:26:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Chahud

Mestrado em Construção Civil – UFMG

S237 Santos, Filipe Luigi Dantas Lima.

Cavilha de madeira reforçada com fibras de vidro como conector em seções mistas de madeira e concreto / Filipe Luigi Dantas Lima Santos. – Salvador, 2025.

188f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César.

Coorientadora: Prof. Dra. Rita Dione Araújo Cunha.

Tese (doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2025.

1. Cavilha de madeira. 2. Concreto. 3. Estruturas mistas. 4. Fibra de vidro. 5. Conektor. I. César, Sandro Fábio. II. Cunha, Rita Dione Araújo. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 691

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete Sinay Neves, Escola Politécnica – UFBA.

*Dedico este trabalho aos meus pais, Eliana e Gino,
como forma de retribuição pela criação, pelos
ensinamentos, pelo incentivo e amor irrestrito.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente à minha família, em especial aos meus pais, Gino e Eliana, e aos meus sobrinhos, Isabela e Murilo. Vocês são minha fonte constante de amor, apoio e inspiração, fundamentais para que eu me mantivesse firme no caminho rumo aos meus objetivos. Estendo meus agradecimentos aos tios, tias, primos e primas, especialmente à Hilda, minha “prima-irmã”, e à minha avó, Maria Luiza, uma mulher admirável, cuja firmeza e longevidade me inspiram profundamente.

Ao Prof. Dr. Sandro Fábio César, agradeço pela amizade, pela crença no potencial desta pesquisa e por sua orientação generosa, pautada por conhecimento, paciência e sensibilidade. Sua sabedoria, afeto e profissionalismo moldaram não apenas este trabalho, mas também minha formação como engenheiro e ser humano. É uma honra contar com sua amizade.

À Prof.^a Dr.^a Rita Dione Araújo Cunha, minha gratidão por ser um pilar de apoio pessoal e acadêmico, pela contribuição nesta pesquisa e por seu exemplo de bondade, honestidade e dedicação. Levo comigo com profunda gratidão a confiança mútua que construímos.

Aos amigos e pessoas próximas, que compartilharam momentos leves e ajudaram a renovar minhas energias nos períodos de dificuldade. Em especial, ao meu companheiro, Rui Cauby, pela parceria construída e pelo carinho constante.

Ao Laboratório de Madeiras (LABMAD/UFBA), espaço onde me formei como pesquisador, engenheiro e professor. Deixo meu sincero agradecimento aos coordenadores, Sandro e Rita, e aos colegas Lucas Lima Costa e Vinícius Sousa Lima, por todas as conversas e pelo ambiente colaborativo e saudável que tornaram esta pesquisa possível. Agradeço também aos estudantes de iniciação científica que fui tutor, Jader Rios e Heloise Santos. Em especial, à Heloise, por ter partilhado comigo a execução da etapa experimental deste trabalho e por sua amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPEC) e à Universidade Federal da Bahia (UFBA), por todo o suporte institucional, pelos excelentes professores, pelos colegas e pela formação. Agradeço especialmente à Daniele, sempre solícita na resolução de dúvidas. Aos professores que contribuíram diretamente para minha formação acadêmica, em ordem alfabética: Cleber Dias, Daniel Véras, Dayana Bastos, Marcelo Cilla, Mônica Guarda, Rita Dione e Sandro Fábio. Suas aulas e trajetórias inspiraram minha visão de mundo e meu entusiasmo pela ciência e pelo ensino.

Agradeço também aos professores, técnicos e alunos que colaboraram com a execução desta pesquisa. Ao Prof. Daniel Véras, ao Prof. Marcelo Cilla e aos integrantes do LEDMa, Marcela, Danilo, Ayrton e Gabriele, pelo espaço e apoio para os ensaios. À Profa. Luciene e aos técnicos Armando e Júlio, pelo suporte no Laboratório de Geotecnica. À Profa. Vanessa Silveira, ao Prof. Cleber Dias e ao técnico Paulo Sant'Anna, pela cessão do espaço do CETA e colaboração na realização de ensaios. A contribuição foi essencial para a finalização deste trabalho. Muito obrigado.

Às empresas que contribuíram com a doação total ou parcial dos materiais utilizados: à Venturoli, pela madeira de eucalipto; à Texiglass, pelo tecido de fibras de vidro; e à Supermix, pelo concreto usinado. O apoio de vocês fortalece a universidade pública e o avanço da ciência em benefício da sociedade.

A todas as pessoas que conheci nessa trajetória e me desejaram sucesso, meu trabalho é reflexo do incentivo e apoio de vocês.

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Processo 88887.611940/2021-00.

SANTOS, Filipe Luigi D. L. **Cavilha de madeira reforçada com fibras de vidro como conector em seções mistas de madeira e concreto**. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2025.

RESUMO

Diante da tendência internacional de reduzir o impacto ambiental causado pela cadeia produtiva da construção civil, os projetos em madeira se mostram como uma resposta cada vez mais adequada para reduzir a parcela de carbono e energia incorporada dos materiais de construção. Este trabalho propõe um sistema de conexão composto por cavilhas de madeira reforçadas com fibras de vidro em matriz epóxi (GFRP) como uma alternativa aos conectores metálicos em estruturas mistas de madeira e concreto. Para atingir este objetivo, o trabalho foi dividido em três etapas: a caracterização da matéria-prima (madeiras, concreto, fibras de vidro e GFRP), a caracterização das cavilhas reforçadas com GFRP quanto suas propriedades físicas e mecânicas (absorção de água, resistência à flexão, a compressão axial, ao embutimento e ao arrancamento) e avaliação dos sistemas de conexão em seções mistas de madeira e concreto (*push-out test*). O ensaio de *push-out* considerou como variável o diâmetro da cavilha, a presença de reforço e a inclinação de inserção da cavilha na madeira, perfazendo oito séries de estudo. Os resultados mostraram que o reforço com GFRP reduziu a taxa média de absorção de água em 85%, aumentou a resistência à flexão em 84% e à compressão em 46%. Em relação ao arrancamento, o comportamento foi limitado pelo baixo índice de esbeltez, enquanto no ensaio de embutimento verificou-se que a orientação em relação às fibras não influenciou a resistência, apenas o comportamento pós-ruptura. Os ensaios de *push-out* evidenciaram a influência da orientação, do diâmetro e do reforço em GFRP sobre a rigidez das conexões. Para cavilhas perpendiculares sem reforço, o aumento do diâmetro de 16 mm para 20 mm resultou em incremento de 91% e 27% no módulo de deslizamento de serviço, respectivamente. Em relação ao reforço de GFRP, a aplicação do reforço aumentou em cerca de 35% para 104% nas séries paralelas e inclinadas, respectivamente. Comparando orientações, as cavilhas inclinadas apresentaram até 51% maior rigidez que as perpendiculares. De modo geral, os resultados mostram é possível ter resultados de eficiência de ação composta comparáveis com conectores metálicos a partir da aplicação do reforço com GFRP.

Palavras-chave: Cavilhas de madeira 1. Compósito de GFRP 2. Ligação cavilhada reforçada com GFRP 3. Eucalipto 4. Maçaranduba 5.

SANTOS, Filipe Luigi D. L. **Glass Fiber-Reinforced Timber Dowel as Connector in Timber-Concrete Composite Sections**. 2025. Thesis (Ph.D. in Civil Engineering) – Polytechnic School, Federal University of Bahia, Salvador, 2025.

ABSTRACT

Considering the global trend to reduce the environmental impact caused by the construction industry, timber-based projects have increasingly emerged as an appropriate response to lowering the carbon footprint and embodied energy of building materials. This study proposes a connection system composed of hardwood dowels reinforced with glass fibers in an epoxy matrix (GFRP) as an alternative to metallic connectors in timber-concrete composite (TCC) structures. To achieve this objective, the research was divided into three stages: characterization of raw materials (timber, concrete, glass fibers, and GFRP), characterization of GFRP-reinforced dowels in terms of physical and mechanical properties (water absorption, bending strength, axial compression, embedment, and pull-out), and evaluation of connection systems in timber-concrete composite specimens through push-out tests. The push-out tests considered dowel diameter, reinforcement, and insertion angle into the timber as variables, resulting in eight experimental series. The results showed that GFRP reinforcement reduced the average water absorption rate by 85%, increased bending strength by 84%, and compression strength by 46%. Regarding pull-out, the behavior was limited by the low slenderness ratio, while embedment tests indicated that fiber orientation had no influence on strength, but affected post-failure behavior. Push-out tests confirmed the influence of orientation, diameter, and GFRP reinforcement on connection stiffness. For perpendicular dowels without reinforcement, increasing the diameter from 16 mm to 20 mm resulted in stiffness gains of 91% and 27% in the service slip modulus, respectively. With GFRP reinforcement, stiffness increased by approximately 35% to 104% in parallel and inclined series, respectively. When comparing orientations, inclined dowels exhibited up to 51% greater stiffness than perpendicular ones. Overall, the findings indicate that GFRP reinforcement enables composite action efficiencies comparable to those of metallic connectors, confirming its potential as a sustainable alternative for timber-concrete composite systems.

Keywords: *Timber dowels 1. GFRP composites 2. GFRP-Reinforced Doweled Connection 3. Eucalyptus spp. 4. Manilkara spp. 5.*

LISTA DE FIGURAS

REFERENCIAL TEÓRICO

Figura 2.1 – Diagrama de deformação de estruturas mistas de madeira e concreto com ação composta total (conexão rígida), ação composta deformável (conexão semirrígida) e sem ação composta.....	38
Figura 2.2 – Curva força – deslizamento típica para alguns sistemas de conexão utilizados em estruturas mistas de madeira e concreto.....	39
Figura 2.3 – Comportamento de seção mista com conector semirrígido.....	43
Figura 2.4 – Esforços internos atuantes na seção mista.....	44
Figura 2.5 – Curva força–deslizamento para determinação dos módulos de deslizamento..	45
Figura 2.6 – Configuração do <i>push-out test</i> para corpos de prova mistos de madeira e concreto: ensaio de corte único.....	48
Figura 2.7 – Configuração do <i>push-out test</i> para corpos de prova mistos de madeira e concreto: ensaio de corte duplo.....	48
Figura 2.8 – Seção "T" e a distribuição das tensões de flexão de sistema misto de madeira e concreto, de acordo com o Método γ	51
Figura 2.9 – Eficiência de algumas conexões entre elementos de madeira de 100 mm por 200 mm para o esforço de tração axial.....	55
Figura 2.10 – Modos de ruptura típicos e simplificados de ligações com pinos de madeira em peças de corte simples.....	57
Figura 2.11 – Ensaio de furo inteiro (FI) para determinação da resistência ao embutimento.....	59
Figura 2.12 – Ensaio de meio furo (MF) para determinação da resistência ao embutimento.....	59
Figura 2.13 – Curvas força–deformação e os parâmetros para determinação da resistência ao embutimento.....	60
Figura 2.14 - Proposta de Schmidt e Daniels (1999) para ensaio de embutimento para cavilhas de madeira.....	62
Figura 2.15 – Deformação plástica típica para cavilhas de madeira.....	64

Figura 2.16 – Exemplo de curva força (F) - deslocamento (d) com dois métodos diferentes para determinação da força (F_y).....	65
Figura 2.17 – Modos de ruptura de cavilhas de madeira submetidas aos ensaios de flexão.	66
Figura 2.18 – Representação de tipos de ensaio de arrancamento: (a) tração pura, (b) tração da barra e compressão da madeira e (c) tração da barra com ancoragem da madeira.	66
Figura 2.19 – Processo de fabricação de cavilha densificada de madeira de pinho escocês (<i>Pinus sylvestris</i>).	68
Figura 2.20 – Cavilhas reforçada com tubo alumínio: (a) preenchimento do tubo com madeira densificada; (b) produto finalizado.....	69
Figura 2.21 – Proposta de cavilha com LVL de bambu densificado: (a) cavilhas de LVL de bambu densificado; (b) pregos de bambu densificados.....	70
Figura 2.22 – Pregos de LVL de faia europeu densificadas, produzidas pela LIGNOLOC®.	71
Figura 2.23 – Classificação dos materiais compósitos	72
Figura 2.24 – Classificação das fibras, segundo sua origem.....	73
Figura 2.25 - Curva tensão - deformação específica típica do ensaio de tração para: fibras, compósito e matriz.....	75

MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 3.1 – Fluxograma do programa experimental da pesquisa.....	81
Figura 3.2 – Estocagem da madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i> no pátio da empresa.	82
Figura 3.3 – Tecido de fibras de vidro.....	83
Figura 3.4 – Processo de aplicação do reforço de fibras de vidro na cavilha de macaranduba.	86
Figura 3.5 - Dimensões do corpo de prova e esquema de ensaio de compressão paralela às fibras.....	91
Figura 3.6 - Dimensões do corpo de prova e esquema de ensaio de flexão em quatro pontos.	92
Figura 3.7 – Dimensões do corpo de prova e esquema de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	93

Figura 3.8 – Preparação dos corpos de prova de concreto: (a) moldagem; (b) adensamento; (c) cura e (d) ensaio de compressão axial com módulo de elasticidade.....	94
Figura 3.9 - Caracterização do concreto no estado endurecido: módulo de elasticidade pelo (a) método das frequências naturais de vibração e (b) velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.....	95
Figura 3.10 - Caracterização do concreto no estado endurecido: módulo de elasticidade pelo (a) módulo estático à compressão e (b) corpo de prova com ruptura típica de topo.....	96
Figura 3.11 – Corpo de prova para ensaio de tração direta da fibra.....	97
Figura 3.12 - Ensaio de picnometria de gás hélio em fibras de vidro: (a) pesagem da amostra; (b) picnômetro.....	98
Figura 3.13 – Corpo de prova para ensaio de tração direta das fibras impregnadas com resina epóxi.....	99
Figura 3.14 – Recipiente de ensaio com controle de umidade da temperatura da água destilada e umidade relativa do ar do ambiente.....	101
Figura 3.15 – Esquema de posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão da cavilha.....	102
Figura 3.16 - Ensaio de compressão axial da cavilha.....	104
Figura 3.17 – Esquema do ensaio de arrancamento.....	105
Figura 3.18 – Processo de fabricação dos corpos de prova de arrancamento: inserção da cavilha e cura da resina epóxi.....	106
Figura 3.19 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de embutimento.....	107
Figura 3.20 – Processo de confecção dos corpos de prova para o ensaio de <i>push-out test</i>	110
Figura 3.21 – Esquema do ensaio <i>push-out test</i> : dados geométricos do corpo de prova... ..	111
Figura 3.22 – Esquema de ensaio de <i>push-out</i> para corpos de prova mistos de madeira e concreto.....	112
Figura 3.23 – Diagramas força–tempo e força–deslocamento para o <i>push–out test</i>	113

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 4.1 – Curva tensão–deformação específica do ensaio de tração do feixe de fibra de vidro.....	119
---	-----

Figura 4.2 – Curva tensão–deformação específica do ensaio de tração do compósito fibra de vidro em matriz epóxi.....	119
Figura 4.3 – Ruptura típica do ensaio de tração direta dos feixes de fibra de vidro.....	120
Figura 4.4 – Ruptura típica do ensaio de tração direta do GFRP	121
Figura 4.5 – Absorção superficial de água líquida ao longo da raiz quadrada do tempo com valor médio de coeficiente de absorção (A_w): grupo controle.....	123
Figura 4.6 – Absorção superficial de água líquida ao longo da raiz quadrada do tempo com valor médio de coeficiente de absorção (A_w): grupo com uma camada de reforço (1R).	123
Figura 4.7 – Absorção superficial de água líquida ao longo da raiz quadrada do tempo com valor médio de coeficiente de absorção (A_w): grupo com duas camadas de reforço (2R).	124
Figura 4.8 – Absorção superficial de água líquida ao longo da raiz quadrada do tempo com valor médio de coeficiente de absorção (A_w): grupo com três camadas de reforço (3R).	125
Figura 4.9 – Incremento de umidade ao longo do tempo de imersão em água.....	126
Figura 4.10 – Curva força–deslocamento para ensaio de flexão do pino: cavilhas com $d_{nom} = 16\text{ mm}$	127
Figura 4.11 – Curva força–deslocamento para ensaio de flexão do pino: cavilhas com $d_{nom} = 20\text{ mm}$	128
Figura 4.12 – Modos de ruptura típicas das cavilhas do grupo controle, independente do diâmetro.....	130
Figura 4.13 – Observação de sequência típica das cavilhas submetidas à flexão até a ruptura.	132
Figura 4.14 – Relação do momento de plastificação efetivo e o diâmetro.....	134
Figura 4.15 – Curvas tensão-deformação específica do ensaio de compressão axial das cavilhas.....	136
Figura 4.16 – Modo de ruptura das cavilhas com e sem reforço após ensaio de compressão axial da cavilha.	138
Figura 4.17 – Curva força–deslocamento do ensaio de arrancamento do grupo CP16–5/8.	139

Figura 4.18 – Curva força–deslocamento do ensaio de arrancamento do grupo CP16–3/4.....	140
Figura 4.19 – Modo de ruptura tipo A: cisalhamento da interface bloco-adesivo.....	141
Figura 4.20 – Modo de ruptura tipo B: tração do bloco.....	141
Figura 4.21 – Distribuição dos dados do ensaio de arrancamento.....	143
Figura 4.22 – Curva resistência ao embutimento–deslocamento para o grupo C16–0.....	144
Figura 4.23 – Curva resistência ao embutimento–deslocamento para o grupo C16–45.....	144
Figura 4.24 – Curva resistência ao embutimento–deslocamento para o grupo C16–90.....	145
Figura 4.25 – Modos de ruptura típicos do ensaio de embutimento de cavilhas.....	147
Figura 4.26 – Estimativa da resistência ao embutimento de acordo com o modelo da NBR 7190–1.....	149
Figura 4.27 – Estimativa da resistência ao embutimento de acordo com o modelo de Miller <i>et al.</i> (2010).....	149
Figura 4.28 – <i>Boxplot</i> de dados de módulo de deslizamento por série.	153
Figura 4.29 – Curva força–deslocamento para o ensaio de <i>push-out test</i> para os corpos de prova com cavilhas de 16 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 90°.....	154
Figura 4.30 – Curva força–deslocamento para o ensaio de <i>push-out test</i> para os corpos de prova com cavilhas de 16 mm de diâmetro, reforçadas e posicionadas em 90°.....	154
Figura 4.31 – Curva força–deslocamento para o ensaio de <i>push-out test</i> para os corpos de prova com cavilhas de 16 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 45°.....	155
Figura 4.32 – Curva força–deslocamento para o ensaio de <i>push-out test</i> para os corpos de prova com cavilhas de 16 mm de diâmetro, reforçadas e posicionadas em 45°.....	155
Figura 4.33 – Curva força–deslocamento para o ensaio de <i>push-out test</i> para os corpos de prova com cavilhas de 20 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 90°.....	156
Figura 4.34 – Curva força–deslocamento para o ensaio de <i>push-out test</i> para os corpos de prova com cavilhas de 20 mm de diâmetro, reforçadas e posicionadas em 90°.....	156
Figura 4.35 – Curva força–deslocamento para o ensaio de <i>push-out test</i> para os corpos de prova com cavilhas de 20 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 45°.....	157

Figura 4.36 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 20 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 45° 157

Figura 4.37 – Modos de ruptura típicos das peças mistas. 160

LISTA DE TABELAS

REFERENCIAL TEÓRICO

Tabela 2.1 – Valores de módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) e último (K_u) para diversos tipos de conectores 46

Tabela 2.2 – Exemplos de ensaios para sistemas de conexão com parafuso de cabeça sextavada com diâmetro de 12 mm. 49

Tabela 2.3 – Características típicas de fibras utilizados como reforço. 75

Tabela 2.4 – Composição química das fibras de vidro, em % em relação ao peso. 76

Tabela 2.5 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras de vidro. 77

MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 3.1 – Característica do tecido de fibra de vidro. 83

Tabela 3.2 – Característica da resina Araldite GY 260 e do endurecedor Aradur 450..... 84

Tabela 3.3 – Dados geométricos das cavilhas. 85

Tabela 3.4 – Dados do compósito cavilha–GFRP 88

Tabela 3.5 – Traço do concreto utilizado para os corpos de prova do ensaio de *push-out*. . 88

Tabela 3.6 - Detalhes dos corpos de prova do ensaio de *push-out test*. 109

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 4.1 – Resultado das propriedades físicas e de estabilidade dimensional das madeiras. 115

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas das madeiras..... 117

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de compressão axial para o concreto com 28 dias de idade. 118

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e estimativa do módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) para o concreto com 28 dias de idade. 118

Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de tração do fio de fibra de vidro e do compósito de fibra de vidro em matriz epóxi.....	120
Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de flexão da cavilha.....	133
Tabela 4.7 – Resultados médios de resistência do ensaio de compressão axial da cavilha.....	136
Tabela 4.8 – Resultados médios do ensaio de arrancamento e frequência dos modos de ruptura.....	139
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de resistência ao embutimento.....	145
Tabela 4.10 – Resultados do <i>push-out test</i>	151
Tabela 4.11 – Valores de módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) para diversos tipos de conectores.....	159
Tabela 4.12 – Rigidez efetiva na flexão e eficiência de uma seção teórica.....	161

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Resultados individuais do <i>push-out test</i> para o grupo D16-X-C.....	181
Tabela A.2 – Resultados individuais do <i>push-out test</i> para o grupo D16-X-R.....	182
Tabela A.3 – Resultados individuais do <i>push-out test</i> para o grupo D16-PAR-C.....	183
Tabela A.4 – Resultados individuais do <i>push-out test</i> para o grupo D16-PAR-R.....	184
Tabela A.5 – Resultados individuais do <i>push-out test</i> para o grupo D20-X-C.....	185
Tabela A.6 – Resultados individuais do <i>push-out test</i> para o grupo D20-X-R.....	186
Tabela A.7 – Resultados individuais do <i>push-out test</i> para o grupo D20-PAR-C.....	187
Tabela A.8 – Resultados individuais do <i>push-out test</i> para o grupo D20-PAR-R.....	188

LISTA DE QUADROS

REFERENCIAL TEÓRICO

Quadro 2.1 – Seções usuais para estruturas mistas de madeira e concreto.....	36
Quadro 2.2 – Resumo do estado da arte do desenvolvimento de novos conectores mecânicos para estruturas mistas de madeira e concreto.....	41
Quadro 2.3 – Comparativo entre os métodos de dimensionamento de sistemas mistos.....	50
Quadro 2.4 – Resumo da influência das variáveis do ensaio de embutimento.....	61
Quadro 2.5 – Classificação das fibras de vidro e sua propriedade física principal.	76
Quadro 2.6 – Resumo de trabalhos sobre madeiras reforçadas com GFRP no Brasil.	78
Quadro 2.7 – Pesquisas sobre o comportamento da interface FRP-madeira.....	80

MATERIAIS E MÉTODOS

Quadro 3.1 – Ensaios de caracterização mecânica da madeira utilizada na pesquisa.....	89
Quadro 3.2 – Ensaios de caracterização do conector.....	100
Quadro 3.3 – Informações de geometria e amostragem do ensaio de absorção de água líquida.	100
Quadro 3.4 – Relação de corpos de prova para ensaio de flexão da cavilha.....	102
Quadro 3.5 – Informações do ensaio de compressão axial da cavilha.....	103
Quadro 3.6 – Informações do ensaio de embutimento para a madeira de eucalipto.	108
Quadro 3.7 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de arrancamento.	106
Quadro 3.8 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de cisalhamento do sistema de conexão (<i>push-out test</i>).	108

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASHTOO	<i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i>
BLC	Bambu Lamelado Colado
CUAD	Concreto de Ultra Alto Desempenho
CCA	Arsenato de Cobre Cromatado
CEN	Comitê Europeu de Normatização
CETA	Centro de Tecnologia da Argamassa
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> ou Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
DAP	Diâmetro na altura do peito
DLT	<i>Dowel Laminated Timber</i>
EEEP	<i>Equivalent energy elastic-plastic</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EYM	<i>European Yield Model</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> ou Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
LABMAD	Laboratório de Madeiras
LaMEM	Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras
LEDMa	Laboratório de Ensaios em Durabilidade dos Materiais
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
MOR	Módulo de Ruptura
MOE	Módulo de Elasticidade

MLC	Madeira Lamelada Colada
NBR	Norma Brasileira
PRF	Polímero Reforçado com Fibras
SPF	<i>Spruce-Pine-Fir</i>
TO	<i>Tasmanian Oak</i>
SiC	Carbeto de Silício
UFBA	Universidade Federal da Bahia
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto romano

A	Área da seção comprimida
A_{v0}	Área de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
A_w	Área da seção da madeira ou coeficiente de absorção
A_c	Área da seção de concreto
a_w	Distância entre o centroide da madeira e da seção mista
a_c	Distância entre o centroide do concreto e da seção mista
b_w	Dimensão horizontal da seção de madeira
b_c	Dimensão horizontal da seção de concreto
d	Diâmetro
D	Ductilidade
e	Excentricidade ou espessura da linha de cola
E	Módulo de elasticidade
$E(\%)$	Eficiência da ação composta
E_w	Módulo de elasticidade da madeira
E_{ci}	Módulo de elasticidade inicial do concreto
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico
$E_{c0,m}$	Módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras
$(EI)_{ef}$	Rigidez efetiva à flexão
$F_{c0,max}$	Força máxima de compressão paralela às fibras
F_{max}	Força máxima
F_{5mm}	Força relativa a uma deformação de 5 mm
$F_{5\%d}$	Força relativa a uma deformação igual à 5% do diâmetro do pino
F_y	Força de escoamento
$F_{ax,max,\theta}$	Força máxima de aplicação para um ângulo θ

f_{ck}	Resistência característica a compressão do concreto
f_{cm}	Resistência média a compressão do concreto
f_{c0}	Resistência a compressão paralela às fibras
f_M	Resistência à flexão da madeira
f_h	Resistência ao embutimento
f_{v0}	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{w,k}$	Resistência característica
f_{ax}	Resistência ao arrancamento
f_t	Resistência à tração
h	Altura da seção
h_w	Altura da seção de madeira
h_c	Altura da seção do concreto
I_w	Momento de inércia da madeira
I_c	Momento de inércia do concreto
L	Comprimento do corpo de prova de concreto
l	Comprimento
l_p	Comprimento de ancoragem da cavilha
l_c	Comprimento crítico da fibra ou comprimento de ancoragem no concreto
l_m	Comprimento de ancoragem na madeira
k	Constante de consideração das unidades de medida
k_i	Rigidez para o instante i
K	Modulo de deslizamento
K_{ser}	Modulo de deslizamento de serviço
K_u	Modulo de deslizamento último
M	Momento
M_y	Momento de plastificação do conector
M_{eff}	Momento de plastificação efetivo

N	Esforço normal
P_y	Força externa aplicada na extremidade do conector;
Q	Força de cisalhamento
q	Carga uniformemente distribuída
s	Espaçamento dos conectores
t	Espessura ou tempo de propagação
U_m	Umidade média
V	Esforço cortante ou velocidade de propagação de onda

Alfabeto grego

α_L	Coeficiente de dilatação térmica
α_i	Coeficiente de ponderação do módulo de elasticidade
ρ	Densidade ou massa específica
σ_w	Tensão normal na madeira
σ_c	Tensão normal no concreto
$\sigma_{m,w}$	Tensão normal na madeira devido a flexão
$\sigma_{m,c}$	Tensão normal no concreto devido a flexão
δ_{exp}	Deslocamento do meio do vão experimental
δ	Desvio padrão ou deslocamento no meio do vão
ε	Deformação específica longitudinal
τ_{max}	Tensão máxima de cisalhamento
π	Constante matemática da razão entre o perímetro e o diâmetro do círculo
ν	Coeficiente de Poisson
θ	Ângulo
ν	Deslizamento
γ	Coeficiente de redução
\emptyset	Diâmetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1.PROPOSTA DO TRABALHO	28
1.1.1. <i>Formulação do problema</i>	28
1.1.2. <i>Hipótese</i>	28
1.2.OBJETIVOS	29
1.2.1. <i>Objetivo geral</i>	29
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	29
1.3.JUSTIFICATIVA.....	29
1.4.DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	30
1.5.PERSPECTIVAS DO TRABALHO.....	32
1.5.1. <i>Originalidade do tema</i>	32
1.5.2. <i>Resultados da pesquisa</i>	32
1.5.3. <i>Contribuições da pesquisa</i>	32
1.6.CONTEÚDO DA TESE	33
2 REFERENCIAL TEÓRICO	34
2.1.ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO	34
2.1.1. <i>Sistemas de conexão</i>	38
2.1.2. <i>Comportamento mecânico</i>	43
2.1.3. <i>Módulo de deslizamento (K)</i>	44
2.1.4. <i>Resistência</i>	47
2.1.5. <i>Caracterização dos sistemas de conexão (push-out test)</i>	47
2.1.6. <i>Métodos de dimensionamento</i>	50
2.1.7. <i>Método γ ou Vigas mecanicamente conjugadas</i>	51
2.1.8. <i>Considerações sobre as estruturas mistas</i>	54
2.2.CARACTERIZAÇÃO DE CONECTORES DE MADEIRA	55
2.2.1. <i>Modelo Europeu de Escoamento (EYM)</i>	56
2.2.2. <i>Resistência ao embutimento (f_h)</i>	58
2.2.3. <i>Momento resistente de plastificação (M_y)</i>	63

2.2.4. <i>Resistência ao arrancamento (f_{ax})</i>	66
2.2.5. <i>Estado da arte sobre o desenvolvimento de cavilhas</i>	67
2.2.6. <i>Considerações sobre os conectores cavilhados</i>	71
2.3.MATERIAIS COMPÓSITOS	72
2.3.1. <i>Polímeros reforçados com fibras (PRF)</i>	73
2.3.2. <i>Polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP)</i>	76
2.3.3. <i>Madeira reforçada com fibras de vidro (GFRP)</i>	78
2.3.4. <i>Matrizes de compósitos madeira–GFRP</i>	79
2.3.5. <i>Comportamento da interface madeira–GFRP</i>	79
2.3.6. <i>Considerações sobre os GFRP como reforço de madeira</i>	80
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
3.1.MATERIAIS	82
3.1.1. <i>Madeira de eucalipto</i>	82
3.1.2. <i>Tecido de fibra de vidro (GFRP)</i>	82
3.1.3. <i>Resina epóxi</i>	84
3.1.4. <i>Cavilhas–GFRP</i>	84
3.1.5. <i>Concreto</i>	88
3.2.CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS.....	88
3.2.1. <i>Ensaio de densidade e estabilidade dimensional</i>	90
3.2.2. <i>Ensaio de compressão paralela às fibras</i>	91
3.2.3. <i>Ensaio de flexão de quatro pontos</i>	92
3.2.4. <i>Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras</i>	93
3.3.CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO.....	94
3.4.CARACTERIZAÇÃO DO REFORÇO	97
3.4.1. <i>Ensaio de tração direta do feixe de fibras de vidro (GFRP)</i>	97
3.4.2. <i>Ensaio de tração direta do GFRP em matriz epóxi</i>	99
3.5.CARACTERIZAÇÃO DAS CAVILHAS.....	100
3.5.1. <i>Ensaio de absorção de água líquida</i>	100
3.5.2. <i>Ensaio de flexão da cavilha</i>	101

3.5.3. <i>Ensaio de compressão axial da cavilha</i>	103
3.5.4. <i>Ensaio de arrancamento</i>	104
3.5.5. <i>Ensaio de resistência ao embutimento</i>	107
3.6. ENSAIO DO SISTEMA DE CONEXÃO (<i>PUSH-OUT TEST</i>)	108
3.6.1. <i>Execução dos corpos de prova</i>	109
3.6.2. <i>Procedimento do ensaio de push-out</i>	112
3.7. TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	113
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	115
4.1.1. <i>Caracterização das madeiras</i>	115
4.1.2. <i>Caracterização do concreto</i>	118
4.1.3. <i>Caracterização do reforço de fibra de vidro</i>	119
4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS CAVILHAS.....	123
4.2.1. <i>Absorção de água</i>	123
4.2.2. <i>Flexão da cavilha</i>	127
4.2.3. <i>Compressão axial da cavilha</i>	136
4.2.4. <i>Arrancamento da cavilha</i>	139
4.2.5. <i>Embutimento da cavilha</i>	143
4.3. LIGAÇÃO MADEIRA-CONCRETO	151
4.3.1. <i>Curvas força-deslizamento</i>	153
4.3.2. <i>Modos de ruptura</i>	159
4.3.3. <i>Eficiência dos conectores</i>	161
5 CONCLUSÕES.....	162
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	164
REFERÊNCIAS.....	165
APÊNDICE A	181

1 INTRODUÇÃO

Durante séculos, a madeira tem sido utilizada como material estrutural nos mais variados tipos de construções. Sua vantagem deve-se à alta resistência em relação ao seu peso próprio, além das suas características relacionadas à sustentabilidade. Desde os primeiros usos até os dias atuais, os sistemas construtivos em madeira têm passado por transformações que visaram extrair as melhores propriedades do material e aumentar o desempenho das edificações de forma a atender as exigências de normas atuais.

Apesar da alta resistência mecânica, diversas espécies de madeira de reflorestamento utilizadas para fabricação de elementos estruturais no Brasil, possuem baixa rigidez, sendo esse um aspecto limitador nos projetos de elementos submetidos à flexão. Por exemplo, as espécies de eucalipto, que abrangem 76% das plantações de florestas, possuem módulo de elasticidade na flexão entre 11 GPa e 17 GPa, tendendo a valores mínimos, devido à baixa idade das madeiras comercializadas no país (Marini, 2022; IBÁ, 2024).

Neste cenário, o sistema estrutural misto de madeira e concreto emerge como uma solução para contornar essas limitações. A técnica une as propriedades mecânicas da madeira e do concreto em uma seção transversal mista de forma que a madeira resista principalmente aos esforços de tração e o concreto resista apenas aos esforços de compressão (Dias, 2005). A associação dos dois materiais resulta em uma seção de maior resistência e rigidez em comparação com os materiais utilizados individualmente.

Outras vantagens podem ser apontadas em relação às estruturas mistas, como: maior amortecimento das vibrações, maior capacidade de isolamento térmico e acústico e maior aproveitamento das características mecânicas de cada material, resultando em uma estrutura mais sustentável (Rodrigues *et al.*, 2016). Tais vantagens justificam o crescente interesse internacional nos sistemas mistos de madeira e concreto, a partir dos anos 2000 (Dias *et al.*, 2015).

A configuração e a geometria dos sistemas mistos dependem da interação entre o produto madeireiro (madeira serrada ou engenheirada), o concreto e o sistema de conexão que garante a transferência de esforços entre os dois materiais (Yeoh, 2010). Dentre os sistemas de conexões disponíveis, os compostos por conectores metálicos têm ganhado espaço no mercado ao longo da última década.

O desempenho mecânico dos conectores metálicos utilizados em construções mistas de madeira e concreto é amplamente discutido na literatura (Marchi *et al.*, 2017; Du *et al.*, 2019; Gan *et al.*, 2023; Sebastian e Cao, 2024; Gong *et al.*, 2025). Alguns autores

argumentam que os conectores metálicos representam entre 15% e 25% da quantidade de energia e carbono incorporado de toda a edificação (Hens *et al.*, 2021; Lukic *et al.*, 2021; Leskovar e Premrov, 2021). Por essa razão, há o interesse em apresentar uma alternativa aos conectores metálicos para se atingir um maior nível de sustentabilidade nas construções mistas.

Nos últimos anos, emergiu a busca por reduzir a emissão de carbono nos produtos modernos de base florestal a partir da substituição dos conectores metálicos por cavilhas. A literatura aponta a diversidade da aplicação de cavilhas em produtos madeireiros, por exemplo, como conector em vigas e painéis de *dowel laminated timber* (DLT) e como reforço em painéis de *cross laminated timber* (CLT) em áreas submetidas à compressão perpendicular às fibras (Dourado *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2021; Moerman *et al.*, 2021).

Apesar das vantagens mecânicas e de sustentabilidade, a utilização de cavilhas em sistemas mistos de madeira e concreto pode ser comprometida pela capacidade hidrofílica da madeira e a retração conjunta da madeira e do concreto, resultando em microfissuras na interface dos dois materiais (Lukacevic *et al.*, 2021). Portanto, nota-se a necessidade da modificação da madeira para que se possa contornar essas consequências indesejadas. Pesquisas recentes demonstram que as limitações impostas pelas propriedades físicas e mecânicas das madeiras podem ser contornadas a partir do reforço com fibras sintéticas em matrizes epóxis (Otoom *et al.*, 2022; Ramkumar *et al.* 2024).

Este trabalho tem como proposta a aplicação de cavilhas reforçadas com tecido de fibra de vidro (GFRP) em matriz epóxi como uma alternativa de conexão mais sustentável em estruturas mistas de madeira e concreto.

1.1. PROPOSTA DO TRABALHO

1.1.1. *Formulação do problema*

Como reforçar cavilhas de madeira para melhorar seu desempenho físico e mecânico com o objetivo de serem empregadas em estruturas mistas de madeira e concreto?

1.1.2. *Hipótese*

Por meio da aplicação de tecido de fibras de vidro em matriz epóxi (GFRP), pode-se melhorar as características físicas e mecânicas de cavilhas de madeira, tornando este conector uma alternativa para a união de madeira e concreto em estruturas mistas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Propor um sistema de conexão utilizando cavilhas de madeira reforçadas com fibras de vidro em matriz epóxi (GFRP) para aplicação em estruturas mistas madeira e concreto.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Verificar a viabilidade técnica dos materiais constituintes (madeira, concreto e fibras de vidro em matriz epóxi) para aplicação em sistemas mistos de madeira e concreto, em relação as suas propriedades físicas e mecânicas;
- b) Avaliar o efeito do reforço com fibras de vidro em matriz epóxi (GFRP) sobre as propriedades físicas e mecânicas das cavilhas de madeira;
- c) Determinar o desempenho mecânico de sistemas de conexão com cavilhas de madeira reforçadas com GFRP aplicadas em elementos estruturais mistos de madeira e concreto.

1.3. JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, as estruturas mistas se consolidaram como uma opção estrutural e economicamente viável em diversos projetos da construção civil, como exemplo, os sistemas de lajes mistas de aço e concreto. Em relação aos projetos em madeira, a bibliografia e a prática de construção já expõem as vantagens de associar a madeira ao concreto nas estruturas de edifícios de múltiplos pavimentos, pontes e viadutos (Calil Jr *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2013). Ilgin e Aslantamer (2024) relatam que 55% dos edifícios altos em madeira construídos na Europa são de estruturas mistas, sendo que 78% destas estruturas são de estruturas mistas de madeira e concreto.

A eficiência das estruturas mistas depende das características do sistema de conexão. Atualmente, os conectores metálicos são amplamente utilizados em contexto internacional, devido as suas características de resistência e ductilidade. Por outro lado, alguns autores expõem que a presença de conectores metálicos em construções mistas de madeira e concreto reduz o aspecto sustentável das construções em madeira, diminuindo a vantagem de usar a madeira como material estrutural (Hens *et al.*, 2021; Lukic *et al.*, 2021).

Esse cenário torna-se ainda mais crítico no contexto brasileiro, uma vez que chapas e parafusos de alta resistência, dedicados exclusivamente ao uso em estruturas mistas, são em sua maioria importados, apresentando elevado custo e altas taxas de carbono incorporado decorrentes do transporte. Embora haja alternativas mais simplificadas, utilizando materiais de menor custo e produção local, como ganchos de vergalhão e chapas perfuradas, a cadeia produtiva do aço está intrinsecamente associada ao alto consumo de energia e à significativa emissão de gases poluentes. Essa realidade contraria os princípios fundamentais da construção sustentável, cujo objetivo é reduzir o consumo de recursos naturais e simplificar os processos construtivos (MMA, 2014).

Outro entendimento consolidado em relação às construções sustentáveis é que a redução do consumo de recursos converge em maximizar a vida útil dos produtos constituintes (*op. cit.*, p. 98). Neste contexto, a bibliografia demonstra que os conectores metálicos em estruturas mistas estão suscetíveis a corrosão, expondo a necessidade de se pesquisar materiais alternativos como conexão entre os dois materiais (Shi *et al.*, 2019; Wacker *et al.*, 2020).

Para atenuar as desvantagens dos conectores metálicos em relação a durabilidade, diversos estudos buscaram a substituição por barras ou tecido de fibra de vidro, que se destacam pelo baixo custo e a satisfatória resistência mecânica (Raftery e Whelan, 2014; Toumpanaki e Ramage, 2021; Ramkumar *et al.* 2024). Tendo em vista as justificativas expostas, este trabalho, prendeu-se ao uso de materiais não susceptíveis a oxidação por corrosão, de baixo custo e presente em território nacional.

1.4. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Para este trabalho, a espécie *Eucalyptus cloeziana* foi escolhida por ser uma madeira adequada para a construção (Alamu e Ewete, 2023) e por sua disponibilidade em regiões do estado da Bahia, próximas ao local onde a pesquisa foi conduzida. Além disso, espécies de rápido crescimento, como as do gênero *Eucalyptus*, contribuem de forma mais significativa para o sequestro de carbono da atmosfera (Goswein *et al.*, 2022; Consentino *et al.*, 2024).

Para a produção das cavilhas, a escolha foi feita de acordo com a recomendação de que a produção de cavilhas de espécies folhosas deve ser feita com madeiras de densidade aparente superior a 600 kg/m³ (Sotayo *et al.*, 2020). Considerando a disponibilidade de madeiras com essa classificação na região metropolitana de Salvador, para este trabalho foram produzidas cavilhas com madeiras de maçaranduba (*Manilkara spp.*), da qual

corresponde a classe de resistência D60 e possui densidade aparente superior à 1000 kg/m³, de acordo com a norma brasileira NBR 7190-3 (ABNT, 2022).

Quanto aos tipos de reforços com fibras, existem as possibilidades dos tecidos sintéticos compostos por fibras de vidro, fibras de carbono, aramida e fibras naturais (sisal, coco, etc.). Para este trabalho, escolheu-se a fibra de vidro, por ser um material disponível no mercado, ter resistência mecânica apropriada para reforços e ter durabilidade adequada em ambientes ácidos (madeira) e alcalinos (concreto) (Cousin *et al.*, 2019).

As matrizes de reforço mais comuns para madeiras são os adesivos orgânicos sintéticos, sendo divididos em dois grupos: os termoplásticos (fenol-formaldeído, uréia-formaldeído e poliacetato de vinila) e os termofixos (epóxis, poliuretanos, poliésteres, fenólicos e aminoplásticos). Nesta pesquisa, escolheu-se a resina epóxi de baixa viscosidade, diante da maior facilidade de impregnação de adesivos epóxi em madeiras de alta densidade (Pizzo e Smedley, 2015), seu baixo custo e disponibilidade no mercado local.

O concreto utilizado neste trabalho foi de classe C35 e relação água/cimento de 0,53, tendo em vista que esta é a classificação usualmente recomendada para estruturas localizadas em zonas urbanas de risco moderado de agressividade ambiental, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023). Esta classificação foi escolhida diante do fato que a maioria das construções brasileiras se encontra em espaço urbano com risco de agressividade ambiental por contaminação por cloretos.

No escopo experimental, esta pesquisa concentrou-se na caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais componentes do sistema proposto. Para a avaliação do desempenho das conexões em seções mistas, foram considerados dois arranjos geométricos: cavilhas posicionadas a 90° e a 45° em relação às fibras da madeira. A escolha desses ângulos baseou-se em critérios técnicos: conectores posicionados a 90° representam uma solução construtiva mais simples, enquanto a inclinação de 45° é respaldada por estudos prévios com pinos metálicos, os quais indicam ganhos em rigidez e resistência quando o ângulo é inferior a 90° (Pigozzo, 2004; Miotto, 2009, Marchi *et al.*, 2017; Bao *et al.*, 2022). Assim, a variação do ângulo de inserção foi adotada como parâmetro de análise relevante. Além da inclinação, avaliou-se também a influência do diâmetro das cavilhas (Ø16 mm e Ø20 mm) e da presença do reforço com fibras de vidro em matriz epóxi.

1.5. PERSPECTIVAS DO TRABALHO

1.5.1. Originalidade do tema

Os conectores de estruturas mistas de madeira e concreto têm sido tema de estudo durante anos. No entanto, muitas pesquisas tomaram como foco o estudo de conectores metálicos, os quais estão mais presentes no mercado atual. Esta pesquisa traz como inovação o estudo e aplicação de ligações com cavilhas de madeira reforçadas com fibra de vidro em matriz epóxi, com a intenção de propor uma conexão resistente à degradação por corrosão.

1.5.2. Resultados da pesquisa

- a) Determinação do comportamento físico e mecânico de cavilhas de madeira reforçadas com fibras de vidro, à luz das suas características de estabilidade dimensional, absorção de água, resistência à flexão, embutimento e arrancamento.
- b) Descrição do comportamento de sistemas de conexão compostos por cavilhas de madeira reforçadas com fibras de vidro, de maneira que se possa identificar o modo de ruptura, a resistência e módulo de deslizamento em sistemas mistos de madeira roliça e concreto.
- c) Demonstração da influência do diâmetro da cavilha e da configuração de penetração na resistência e na rigidez dos sistemas de conexões.

1.5.3. Contribuições da pesquisa

- a) O desenvolvimento de projetos de estruturas mistas de madeira e concreto, tendo em vista que a união das propriedades dos materiais tem resultado em estruturas com melhores propriedades mecânicas do que quando consideradas separadamente.
- b) A ampliação das possibilidades de uso da madeira como material estrutural e, em especial, como material de ligação das estruturas, em alternativa aos conectores metálicos.
- c) O aprofundamento no conhecimento de técnicas de reforço de madeira de alta densidade com fibras sintéticas, considerando que suas características anatômicas dificultam a aderência da matriz.

1.6. CONTEÚDO DA TESE

A estrutura desta tese está dividida em cinco seções, que compreendem: a introdução, o referencial teórico, os materiais e métodos, os resultados e as conclusões. A presente seção confere a introdução do trabalho, dividida entre a proposta do trabalho, os objetivos, a justificativa, a delimitação e as perspectivas do trabalho.

Na segunda seção é apresentada a revisão teórica necessária para o entendimento sobre o tema e da problemática da pesquisa. Neste capítulo foram explanadas sobre as estruturas mistas de madeira e concreto, contendo suas fundamentações e o estado da arte em torno do tema. Em seguida, são apresentadas as características dos conectores por pinos em elementos de madeira, a base de cálculo, as propriedades mecânicas fundamentais e o estado da arte relativo ao uso de cavilhas de madeira. Por fim, foram feitas considerações sobre os materiais compósitos, com foco para os compósitos de madeira reforçada com fibra de vidro, tema central deste trabalho.

A terceira seção apresenta as explicações sobre o programa experimental, na qual estão descritos os materiais e métodos adotados para atingir os objetivos desta pesquisa. Este seção está dividida em três subseções: a primeira descreve as matérias-primas da pesquisa e suas propriedades básicas, a segunda mostra o processo de fabricação do compósito GFRP-madeira e explana os métodos de caracterização do material, a terceira apresenta a produção dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento duplo de madeira-concreto (*push-out test*) e os procedimentos utilizados. A seção é finalizada com a demonstração do tratamento estatístico utilizados no trabalho.

Na quarta seção se encontram os resultados coletados na fase experimental desta pesquisa, organizados em três subseções que incluem: a caracterização das matérias-primas, a caracterização das cavilhas e os resultados encontrados nos ensaios de *push-out*.

A quinta seção apresenta as conclusões da campanha experimental e os trabalhos futuros que possam ser realizados a partir dos questionamentos desta tese.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta os conceitos fundamentais e o estado da arte referente aos principais temas abordados neste trabalho. A primeira subseção traz o conceito de estruturas mistas de madeira e concreto. A segunda subseção aprofunda o conhecimento sobre compósitos, trazendo os aspectos relacionados a matrizes e reforços em madeiras. Por fim, a última subseção aborda a caracterização mecânica de conectores de madeira e o uso de cavilhas em pesquisas contemporâneas.

2.1. ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO

A escassez de aço durante os períodos de guerras na primeira metade do século XX levou à necessidade do uso de materiais alternativos para a reconstrução das cidades afetadas pelos conflitos e para a expansão da infraestrutura em novas zonas urbanas industrializadas (Wacker *et al.*, 2020). Ao longo da década de 1920, foram registradas as primeiras técnicas de estruturas mistas de madeira e concreto, aplicadas principalmente em construções de pontes em áreas rurais dos Estados Unidos, utilizando peças rolíças de madeira, perfis metálicos ou pregos, associados a uma camada de concreto (Yeoh, 2010; Wacker *et al.*, 2017; Wacker *et al.*, 2020).

Em 1944, a AASHTO (*American Association of State Highways and Transportation Officials*) introduziu, pela primeira vez, um manual técnico simplificado para a construção de pontes com sistemas mistos (Rodrigues *et al.*, 2013). Poucos anos depois, entretanto, o uso desses sistemas entrou em declínio devido à estabilização dos preços do aço e às incertezas quanto à durabilidade da madeira (Dias *et al.*, 2015).

A partir dos anos 2000, observou-se um resgate do interesse por estruturas mistas com madeira, impulsionado pelos avanços nas técnicas de preservação da madeira e pela crescente preocupação com a sustentabilidade na construção civil, dada a capacidade da madeira em estocar carbono (Rodrigues *et al.*, 2016; Wacker *et al.*, 2020; Behilo, 2025). Cabe ressaltar que, apesar das preocupações relacionadas à durabilidade, Wacker *et al.* (2020) relatam que centenas de pontes construídas ao longo dos anos 20 e 30 ainda permanecem em uso.

Nos últimos anos, diversos estudos destacaram os benefícios das estruturas mistas de madeira e concreto, como a proteção da madeira contra o fogo (Molina e Calil Jr., 2018), a redução dos efeitos de cargas dinâmicas e vibrações (Skinner *et al.*, 2014; Reynolds *et al.*, 2016), o maior conforto acústico (Martins *et al.*, 2015) e a diminuição do peso total da

edificação, o que resulta em soluções estruturais mais simples para fundações (Zeitz *et al.*, 2019). Esse sistema também se mostra eficiente na recuperação estrutural de edificações antigas em madeira (Faggiano *et al.*, 2020; Jardim *et al.*, 2025).

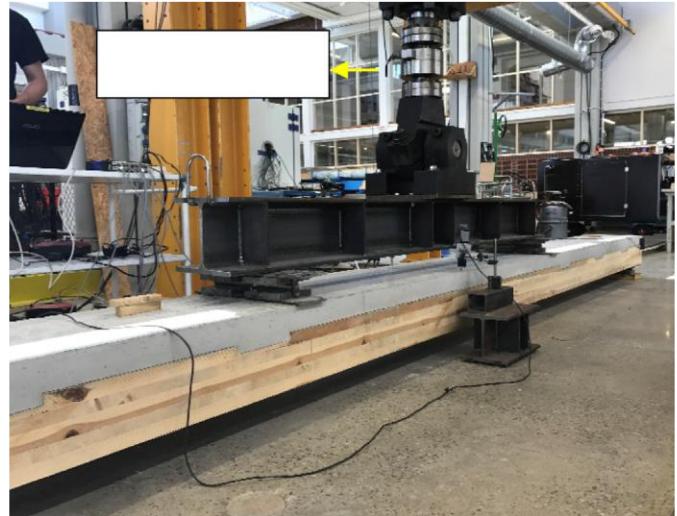
Embora se trate de uma técnica construtiva originada em cerca de 100 anos, apenas alguns países possuem normas específicas para estruturas mistas de madeira e concreto, como os Estados Unidos (AASHTO, 2002), a Comunidade Europeia (CEN, 2004a) e a Austrália (RTA, 2008). No Brasil, a norma de estruturas de madeira, a NBR 7190-1 (ABNT, 2022), ainda não contempla um capítulo dedicado ao tema, embora algumas iniciativas já tenham sido publicadas nos últimos anos.

O “Programa Emergencial de Pontes para o Estado de São Paulo”, coordenado pelo Laboratório de Madeiras da Universidade de São Paulo (LaMEM-EESC), construiu cinco pontes com o sistema misto de madeira e concreto. Entre elas, destaca-se um tabuleiro de concreto apoiado sobre peças justapostas de *Eucalyptus citriodora* tratadas com arseniato de cobre cromatado (CCA), conectadas por barras de aço trefilado (Calil Jr. *et al.*, 2006).

Ao longo dos anos, a Construtora ITA realizou diversas obras residenciais com o uso de sistemas mistos de madeira e concreto. Como exemplo, Alvim *et al.* (2000) detalharam a construção de um condomínio horizontal na cidade de São Paulo, em que os sobrados foram edificados com vigas de madeira serrada de jatobá (*Hymenaea spp.*) conectadas a lajes de concreto por meio de pregos. Mais recentemente, a empresa Crosslam tem comercializado painéis pré-moldados ou de concretagem *in loco* de lajes mistas em CLT e concreto, empregando entalhes, parafusos autoatarrazantes e chapas perfuradas como conectores.

No meio acadêmico, diversos trabalhos brasileiros contribuíram para o avanço do conhecimento sobre estruturas mistas, tanto sob a ótica experimental quanto numérica e analítica. Dentre eles, destacam-se os estudos com madeira roliça (Pigozzo, 2004; Segundinho, 2005), madeira serrada (Souza, 1997; Soriano, 2001; Molina, 2008; Criado *et al.*, 2024), com peças de madeira lamelada colada e conectores metálicos (Miotto, 2009; Fernandes, 2022), e, mais recentemente, com painéis de CLT e concreto utilizando conectores metálicos e entalhados (Santos, 2021; Bergamin, 2024). O Quadro 2.1 ilustra alguns exemplos de configurações usuais de sistemas mistos de madeira e concreto.

Quadro 2.1 – Seções usuais para estruturas mistas de madeira e concreto.

Tipo	Descrição	Imagen
[1]	Vigas roliças justapostas de eucalipto tratado sob laje de concreto armado, conectadas com barras coladas de aço galvanizado, dobradas em formato de gancho.	
[2]	Viga de seção retangular de MLC reforçada com fibra de vidro e tabuleiro de concreto convencional, conectados por barras de aço coladas, dobradas em formato de gancho.	
[3]	Painel de CLT e laje de concreto conectados por entalhe na madeira reforçadas com parafusos autoatarraxantes cruzados.	

Fonte: [1] Calil Jr et al. (2006), p. A23; [2] Miotto e Dias (2015), p.150; [3] Jiang e Croccetti (2019), p.131.

As estruturas mistas de madeira e concreto, além de apresentarem diferentes geometrias, podem variar conforme diversos fatores, tais como: o tipo de produto de madeira utilizado (madeira serrada, madeira engenheirada ou madeira roliça), as propriedades e a classificação da madeira, o tipo de laje (pré-moldada ou moldada no local), as propriedades do concreto, o sistema de conexão e a ocorrência de material de reforço em algum dos elementos da composição.

Em relação ao tipo de produto de madeira, Faggiano *et al.* (2020) avaliaram peças serradas de madeira de castanha (*Castanea spp.*) que apoiavam lajes de concreto convencional, em reforço de edifícios históricos. Martins *et al.* (2016) testaram lajes de concreto leve de grânulos de cortiça apoiadas em vigas feitas com peças roliças de pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*). Du *et al.* (2019) produziram vigas de MLC de madeira de abeto-de-Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) e laje de concreto de classes C40 (convencional) a C60 (alto desempenho). Esses exemplos demonstram a ampla variedade de combinações possíveis em estruturas mistas, cujos resultados apresentaram diferenças significativas.

Em relação à influência do tipo de concreto no desempenho estrutural das estruturas mistas de madeira e concreto, Jiang *et al.* (2017) afirmam que a resistência e a rigidez máxima dos sistemas mistos são adquiridas nos primeiros sete dias de cura, quando a resistência característica do concreto atinge 75% da resistência final de compressão. Na prática, os autores concluem que o tempo necessário para a retirada das escoras em estruturas mistas é inferior ao exigido para lajes maciças de concreto armado, evidenciando mais uma vantagem do sistema.

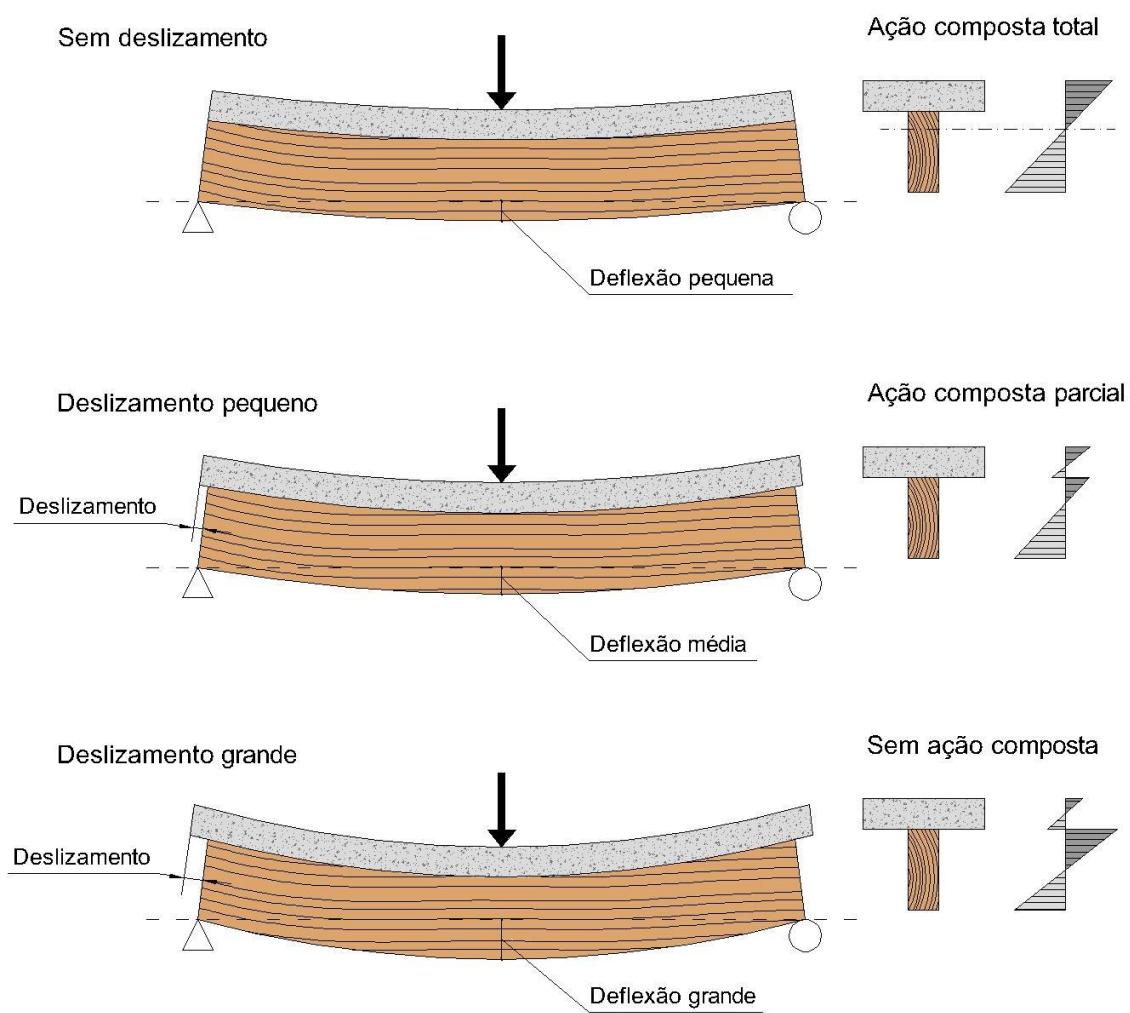
Para o uso de concreto leve é necessário maior quantidade de conectores, o que encarece o sistema em comparação ao uso de concreto convencional (Siddika *et al.*, 2021). Adicionalmente, a ruptura do sistema tende a acontecer pela ruptura do concreto, situação muitas vezes indesejada, devido à característica frágil da ruptura do concreto (Marchi *et al.*, 2017). Liu *et al.* (2025) destacam ainda que o menor módulo de elasticidade do concreto leve acentua os efeitos de fluência ao longo do tempo.

Em contrapartida, o uso de concreto de alto e ultra alto desempenho resulta em configurações altamente rígidas, exigindo menor número de conectores, com ruptura limitada aos conectores e na madeira, materiais mais dúcteis que o concreto (Lamothe *et al.*, 2020). O concreto de alto desempenho também se mostra promissor por apresentar menor suscetibilidade aos efeitos de fluência ao longo dos anos (Augeard *et al.*, 2020). No entanto, ressalta-se a maior complexidade e o custo elevado dos materiais necessários para sua produção.

2.1.1. Sistemas de conexão

Os sistemas de conexão entre madeira e concreto são responsáveis por fazer a transferência das tensões entre os dois materiais, garantindo que eles funcionem com certo grau de monolitismo, além de evitar que os materiais se separem. O esquema mostrado na Figura 2.1 refere-se às três condições diferentes de como as seções mistas podem trabalhar de acordo com a rigidez do sistema de conexão.

Figura 2.1 – Diagrama de deformação de estruturas mistas de madeira e concreto com ação composta total (conexão rígida), ação composta deformável (conexão semirrígida) e sem ação composta.



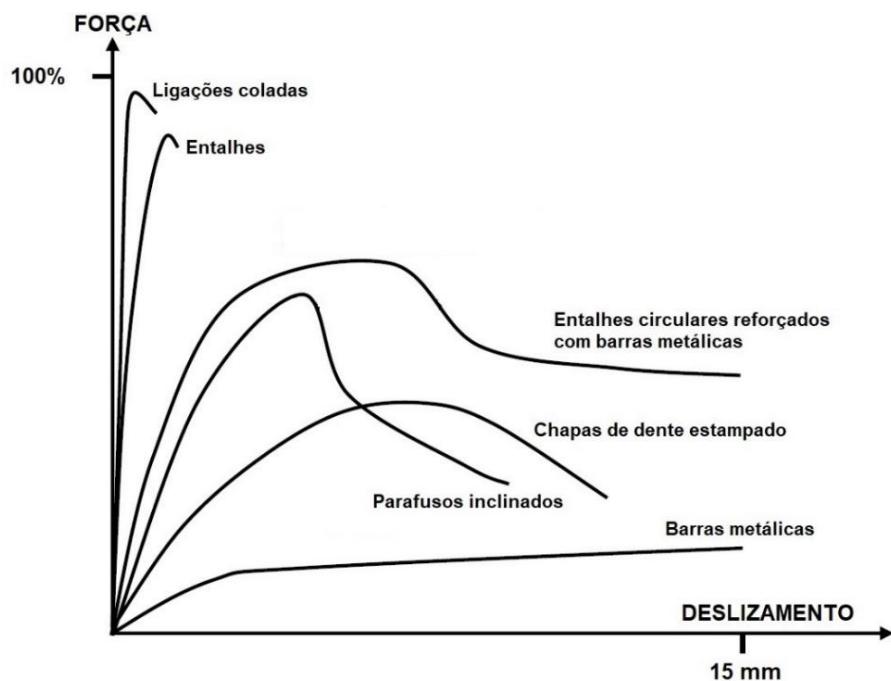
Fonte: Lukaszewska (2009), p. 38.

Yeoh (2010) e Jiang e Crocetti (2019) definem que a capacidade monolítica dos sistemas mistos é chamada de ação composta e explicam as três condições apresentadas na Figura 2.1. A primeira condição representa o limite superior, no qual ocorre a transferência total das tensões entre os dois materiais por meio de um sistema de conexão com rigidez

infinita. Nesse caso, os conectores são definidos como rígidos. A segunda condição corresponde à transferência parcial das tensões, realizada por um sistema de conexão com rigidez finita, caracterizando os conectores como semirrígidos. A terceira condição refere-se ao limite inferior, em que não há qualquer conexão entre os materiais, resultando em deformações independentes entre eles. Na prática, os conectores mecânicos apresentam rigidez finita, o que faz com que as estruturas mistas geralmente operem na segunda condição. As ligações coladas representam uma exceção, pois se aproximam da rigidez infinita (Figura 2.2).

Os sistemas de conexão podem ser classificados em três grupos principais: os conectores mecânicos, os entalhes e as ligações coladas (Dias et al., 2018). Devido à ampla variedade de combinações possíveis entre os materiais, as propriedades mecânicas de cada tipo de ligação podem apresentar grande variação. A Figura 2.2 ilustra o comportamento mecânico típico de alguns sistemas de conexão.

Figura 2.2 – Curva força – deslizamento típica para alguns sistemas de conexão utilizados em estruturas mistas de madeira e concreto.



Fonte: Dias (2005), p.16.

Os conectores mecânicos são elementos produzidos a partir de materiais metálicos, vegetais ou poliméricos. Exemplos incluem parafusos, pregos, chapas, barras e cavigilhas. A principal característica desses conectores é promover a aderência mecânica entre os dois materiais, possibilitando a transferência de esforços por contato. O comportamento mecânico desses sistemas varia significativamente, pois depende de diversos fatores, como as

dimensões do conector, o arranjo, a quantidade empregada, a orientação em relação às fibras da madeira (perpendicular ou inclinada) e as propriedades mecânicas do próprio conector.

De modo geral, as ligações com conectores mecânicos apresentam maior ductilidade em comparação às ligações por entalhes ou coladas. Essa característica é atribuída ao comportamento dúctil do aço, no caso das conexões metálicas, e às compressões localizadas na madeira, observadas nas cavilhas e nas barras com reforço de fibras sintéticas, por exemplo, vergalhões de fibra de vidro (Estévez-Cimadevila *et al.*, 2020). O comportamento dúctil é evidenciado nas curvas correspondentes a parafusos, barras metálicas e chapas de dente estampado, conforme representado na Figura 2.2.

Os produtos metálicos são, de forma geral, os conectores mecânicos mais utilizados. Diversos fatores justificam essa escolha, como a possibilidade de utilizar componentes de menor dimensão, a viabilidade de soluções simplificadas em obra e a disponibilidade de alternativas economicamente acessíveis. Esmaeldoust *et al.* (2025) afirmam que as barras e os parafusos tendem a apresentar melhor desempenho quando inseridos de forma inclinada na madeira, com ângulos de 30° ou 45°.

As ligações por entalhe são obtidas a partir de um corte na madeira, que é posteriormente preenchido com concreto. A transferência de tensões ocorre por contato direto entre os materiais. O desempenho desse tipo de conexão depende da inclinação das fibras da madeira em relação à superfície de contato, da resistência do concreto ao cisalhamento e do formato e dimensões do entalhe (Dias, 2005; Yeoh, 2010).

As conexões por entalhes tendem a ser mais econômicas do que outras soluções. No entanto, seu comportamento tipicamente frágil, associado à ruptura por cisalhamento paralelo às fibras da madeira, conforme indicado na curva de entalhes da Figura 2.2, costuma ser indesejado (Dias *et al.*, 2018). É comum que os entalhes sejam combinados com conectores mecânicos com o objetivo de aumentar a ductilidade do sistema, como ilustrado na curva referente aos entalhes circulares reforçados com barras de aço da Figura 2.2.

Santos (2021) e Bergamin (2024) compararam placas formadas pela associação de CLT e concreto conectadas com entalhes e parafusos em diferentes configurações. Os resultados mostram que sistemas compostos apenas por parafusos inclinados tendem a apresentar baixa rigidez, porém elevada ductilidade. Por outro lado, as ligações entalhadas demonstram maior rigidez, mas são caracterizadas por uma ruptura frágil. As pesquisas também concluíram que a combinação entre entalhes e parafusos resulta em um comportamento mais equilibrado, tanto em termos de rigidez quanto de modo de ruptura. Os resultados obtidos por esses autores são confirmados por Jiang e Crocetti (2019).

As ligações coladas utilizam adesivos estruturais capazes de promover uma conexão suficientemente rígida na interface entre os dois materiais, garantindo a transferência dos esforços de cisalhamento por aderência mecânica, tendo em vista que os adesivos estruturais para madeira atuam por penetração nos poros da madeira. Essa solução é comumente aplicada na conexão entre madeira e lajes pré-moldadas de concreto.

Fragiacomo e Lukaszewska (2013) argumentam que a união do concreto em estado endurecido à madeira por meio de adesivos é vantajosa, pois evita as tensões geradas pela retração do concreto durante a cura e da influência do contato com a madeira no processo de hidratação do cimento. Schäfers e Seim (2011) justificam que a união de lajes pré-fabricadas de concreto a peças históricas de madeira é mais adequada para a execução de serviços de *retrofit*.

Devido ao comportamento frágil de ruptura, conforme ilustrado na Figura 2.2, as ligações coladas são normalmente combinadas com elementos dúcteis, como chapas metálicas, fibras ou parafusos metálicos (Kanócz e Bajzcerová, 2015; Fu *et al.*, 2020). Os autores alertam, no entanto, que os conectores metálicos precisam ser suficientemente resistentes para que apenas entrem em ruptura após o rompimento do adesivo. Vale destacar que a norma brasileira NBR 7190-1 (ABNT, 2022) não permite o uso de ligações coladas em estruturas de madeira.

O estudo dos sistemas de conexão entre madeira e concreto tem sido objeto de investigação em diversos países ao longo dos anos. A maioria dos trabalhos concentra-se em ensaios experimentais voltados à quantificação dos efeitos da ação composta em seções mistas, à avaliação da capacidade de carga e à identificação dos mecanismos de falha dos sistemas de conexão adotados. Alguns estudos experimentais recentes, com ênfase no desenvolvimento de novos conectores, são apresentados no Quadro 2.2.

Os resultados revelam uma diversidade de soluções construtivas, com destaque para conectores baseados em materiais não metálicos ou em composições híbridas, como pinos de concreto reforçados, fibras de carbono, anéis de liga metálica leve e compósitos cimentícios. Também se observou o emprego de estratégias para melhorar a aderência entre os materiais, como o uso de microentalhes na madeira ou de camadas intermediárias, como por exemplo, a borracha. De modo geral, os estudos apontam para a viabilidade técnica dessas alternativas, demonstrando desempenho compatível ou superior ao de conectores metálicos convencionais, com diferentes níveis de rigidez, ductilidade e resistência, dependendo da configuração adotada.

Quadro 2.2 – Resumo do estado da arte do desenvolvimento de novos conectores mecânicos para estruturas mistas de madeira e concreto.

Ref.	Conector	Principais conclusões
[1]	Pino de concreto com e sem reforço metálico	Identificou que os pinos estão sob esforço de flexão, portanto, o reforço com barras metálicas aumenta consideravelmente a resistência e rigidez das cavilhas de concreto.
[2]	Anel metálico de liga de alumínio pregado à madeira	A ruptura ocorre por cisalhamento paralelo às fibras da madeira na interface com o conector, sendo caracterizado pela ruptura frágil do sistema.
[3]	Pino metálico revestido com concreto de ultra alto desempenho	Desenvolvimento de um novo tipo de conector associando a ductilidade do aço e a resistência do concreto. Os valores de resistência tiveram baixa dispersão, no entanto, os valores de rigidez foram dispersos, concluindo maior necessidade de estudo do conector.
[4]	Chapas de compensado de madeira de faia (<i>Fagus sylvatica</i>)	As propriedades mecânicas da conexão com chapa compensada são compatíveis com outros materiais tradicionais (parafusos e barras). A ruptura ocorre sempre na chapa compensada.
[5]	Chapa metálica reforçada com borracha	Diferentes configurações foram testadas e resultados diversos foram encontrados. De maneira geral, a camada de borracha protege a chapa metálica de corrosão, além de colaborar com a colagem da chapa na madeira.
[6]	Barras e chapas de fibra de carbono coladas à madeira	As barras de fibra de carbono possuem maior resistência e rigidez que as chapas de fibra de carbono, devido maior aderência com o concreto. Também se concluiu que o custo dos conectores de fibra de carbono é maior que os tradicionais parafusos metálicos.
[7]	Superfície estriada da madeira com microentalhes	Os autores apontam a possibilidade de se atingir um grau de ductilidade na ruptura, dependendo da configuração do corte dos entalhes.
[8]	Compósito de matriz cimentícia reforçado com fibras de carbono e aço	O compósito cimentício possui alta rigidez, fazendo com que a ligação tenha elevada eficiência. Os autores forneceram uma taxa de armadura necessária para conferir ductilidade na ligação.
[9]	Bloco de madeira furfurilada ancoradas com parafusos metálicos.	A configuração do conector cria uma dependência da resistência ao arrancamento do parafuso. Nesse sentido, a furfurilação do bloco de ancoragem da madeira se mostra eficaz, uma vez que aumenta significativamente a densidade da madeira.
[10]	Pino de concreto de alto desempenho armado com aço inoxidável.	Por utilizar de um material de alta resistência ao cisalhamento, o conector teve um desempenho satisfatório, quando inserido à 90° em relação às fibras da madeira.

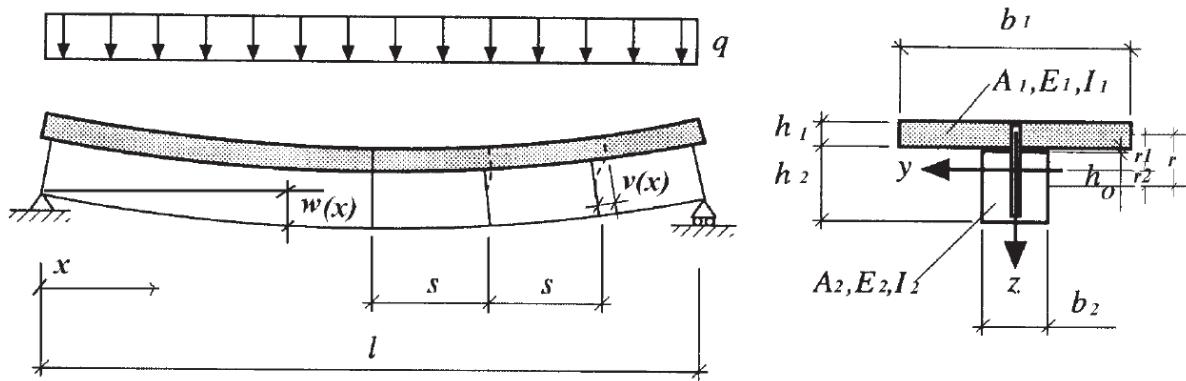
Fonte: Feito pelo Autor, com referências de: [1] Deam *et al.* (2008); [2] Fernandez-Cabo *et al.* (2012); [3] Auclair *et al.* (2016); [4] Dankova *et al.* (2019); [5] Zhu *et al.* (2019); [6] Hadigheh *et al.* (2021); [7] Müller e Frangi (2021); [8] Shan *et al.* (2022); [9] Crocetti *et al.* (2010); [10] Li *et al.* (2024).

2.1.2. Comportamento mecânico

Os sistemas mistos de madeira e concreto têm como premissa básica o funcionamento integrado dos dois materiais, de modo que atuem de forma o mais monolítica possível. Yeoh (2010) afirma que três critérios fundamentais devem ser atendidos para garantir o adequado comportamento mecânico da estrutura mista: a linha neutra da seção transversal deve estar próxima da interface entre a madeira e o concreto, o sistema de conexão deve apresentar rigidez suficiente para transferir as tensões de cisalhamento e o produto de madeira deve possuir resistência adequada para suportar os esforços de flexão e de cisalhamento.

Ceccotti (2002) esclarece que o comportamento estrutural de sistemas mistos pode ser analisado a partir da consideração de uma viga de seção composta, formada por duas camadas (uma de concreto e outra de madeira), biapoiada e submetida a uma carga uniformemente distribuída ao longo do vão. Em sistemas com conexão semirrígida, ocorre deslizamento relativo entre as camadas ao longo do comprimento da viga, representado por $v(x)$ (Figura 2.3). Por essa razão, a teoria clássica da flexão de vigas de Euler-Bernoulli não pode ser aplicada diretamente aos sistemas mistos, uma vez que pressupõe que as seções transversais permanecem planas e perpendiculares à linha neutra, sem deslizamento entre as camadas (Rodrigues *et al.*, 2013).

Figura 2.3 - Comportamento de seção mista com conector semirrígido.



Legenda: $w(x)$ = deflexão da viga. $v(x)$ = deslizamento relativo do conector. s = espaçamento entre os conectores. q = carga uniformemente distribuída. $b_1, b_2, h_1, h_2, A_1, A_2, E_1, E_2, I_1, I_2$ = base (b), altura (h), área (A), módulo de elasticidade (E) e momento de inércia (I) para o concreto (1) e a madeira (2). h_0 = profundidade da linha neutra. r_1, r_2 = distância do centroide do concreto (1) e da madeira (2) até a linha neutra da seção mista. r = braço de alavanca.

Fonte: Ceccotti (2002), p. 267.

A Figura 2.4 ilustra os esforços internos e as deformações atuantes em uma seção de viga mista. Na configuração deformada, surgem forças axiais internas nas camadas, de mesma magnitude e direções opostas, representadas por N_1 e N_2 , conforme indicado na Equação (2.1). Essas forças axiais são diretamente proporcionais à força de cisalhamento

nos conectores, denominada Q , cuja magnitude em cada ponto depende do deslizamento relativo local (v) e da rigidez do conector (K), conforme demonstrado na Equação (2.2).

$$N_1 = N_2 = N \quad (2.1)$$

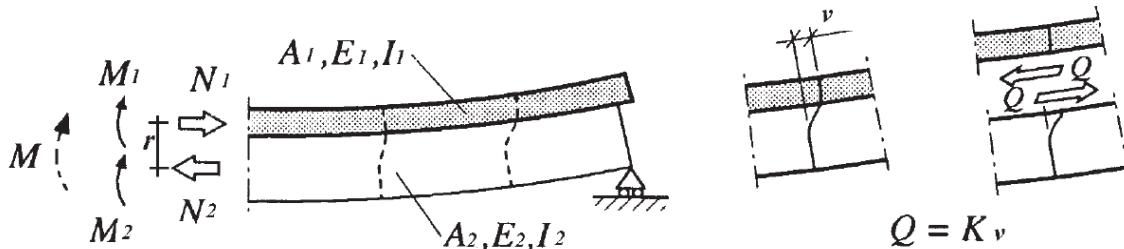
$$Q = K \cdot v \quad (2.2)$$

Dessa forma, o momento resistente total da viga passa a ser composto pela soma dos momentos fletores locais em cada camada ($M_1 + M_2$) e do momento gerado pelo binário das forças axiais N_1 e N_2 , conforme expressa a Equação (2.3).

$$M = M_1 + M_2 + Nr \quad (2.3)$$

Por fim, à medida que a rigidez da conexão (K) aumenta, os momentos fletores locais nas camadas ($M_1 + M_2$) diminuem, enquanto as forças axiais aumentam. A redução dos momentos fletores reflete o fato de que o aumento dos valores de K leva à diminuição da flecha da viga, sendo, portanto, a rigidez da conexão um dos principais parâmetros de dimensionamento em seções mistas.

Figura 2.4 – Esforços internos atuantes na seção mista.



Legenda: $A_1, A_2, E_1, E_2, I_1, I_2, N_1, N_2, M_1, M_2$ = área (A), módulo de elasticidade (E), momento de inércia (I), esforço normal (N) e momento fletor (M) para o concreto (1) e a madeira (2). Q = força de cisalhamento. K = módulo de deslizamento. v = deslizamento.

Fonte: Ceccotti (2002), p. 268.

2.1.3. Módulo de deslizamento (K)

Como discutido na subseção anterior, o módulo de deslizamento (K) tem sido utilizado como o principal parâmetro de dimensionamento para os sistemas de conexão, pois esse coeficiente incorpora as diversas variáveis dos materiais envolvidos. Considerando que a maioria dos conectores não apresenta comportamento linear, é comum a aplicação do método da reta secante sobre curvas força–deslizamento de ensaios estáticos (Miotto, 2009; Pigozzo *et al.*, 2018). Esses autores destacam, entretanto, que não há consenso em relação aos critérios adotados nesse método, o que implica na ausência de padronização dos valores de

K encontrados na literatura e, consequentemente, na dificuldade em comparar resultados entre diferentes estudos.

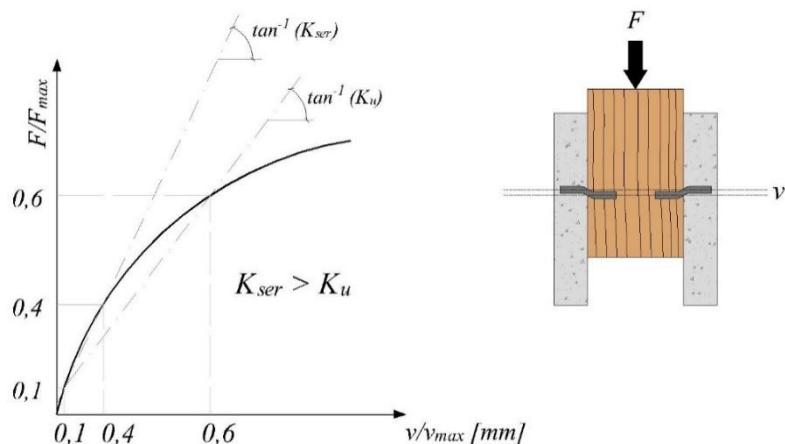
Ceccotti (1995) propõe que, para a análise global de estruturas mistas, o concreto seja considerado como não fissurado, ou seja, atuando em regime elástico linear. Para a análise da seção transversal, entretanto, o autor recomenda considerar o concreto fissurado até seu limite de escoamento idealizado, conforme definido pela norma europeia EN 1992-1 (CEN, 2004) e adotada também pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023).

Dessa forma, por assimilação de critérios estabelecidos em normas aplicáveis a outras configurações de seções mistas, como madeira–madeira ou aço–concreto, é comum que o módulo de deslizamento seja determinado em relação a dois pontos distintos da curva força–deslizamento. O primeiro ponto, correspondente a 40% da força máxima, é denominado módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}). O segundo, correspondente a 60% da força máxima, é conhecido como módulo de deslizamento último (K_u). Para conectores metálicos, a norma europeia EN 1995-1 (CEN, 2004b), conhecida como Eurocode 5, estabelece uma relação entre K_u e K_{ser} , conforme apresentado na Equação (2.4).

$$K_{ser} = \frac{2}{3} K_u \quad (2.4)$$

A Figura 2.5 ilustra a curva força–deslizamento típico e a determinação dos dois valores de módulo de deslizamento. De modo geral, os trechos iniciais da curva são desconsiderados, uma vez que correspondem a deformações associadas à acomodação do sistema (Miotto, 2009). Na bibliografia, é comum a desconsideração da curva até o limite $F/F_{max} = 0,1$. A Tabela 2.1 apresenta valores típicos de módulo de deslizamento para diferentes tipos de conectores encontrados na literatura.

Figura 2.5 – Curva força–deslizamento para determinação dos módulos de deslizamento.



Fonte: O Autor.

Tabela 2.1 – Valores de módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) para diversos tipos de conectores.

Ref.	Produto de madeira	Conector	K_{ser} (kN/mm)
[1]	Cupiúba (serrada)	Quatro pregos Ø6,58 mm em 90°	6,0
		Dois pregos Ø6,58 mm em 90°	4,7
[2]	<i>Eucalyptus citriodora</i> (rolíço)	Barra de aço nervurada CA-50 Ø19,0 mm em 90°	22,83
		Ganchos de barra de aço nervurada CA-50 Ø8,0 mm inclinados em "X"	37,9
[3]	<i>Lyptus</i> (MLC)	Ganchos Ø8,0 mm de inclinados em 45° e colados com adesivo epóxi, ancoragem de 88 mm	142,9
		Ganchos Ø8,0 mm de inclinados em 45° e colados com adesivo epóxi, ancoragem de 110 mm	112,9
		Chapa metálica perfurada, espessura de 4,75 mm	339,4
[4]	Bambu (BLC)	Pino de CUAD reforçado com fibras Ø19 mm	27,9
[5]	Abeto de Douglas (MLC)	Parafuso de cabeça sextavada Ø10 mm em 45°	14,8
		Parafuso de cabeça sextavada Ø14 mm em 45°	20,5
[6]	<i>Pinus taeda</i> (CLT)	Parafuso Rothoblass® VGS9240 em 45°	19,8
		Entalhe reforçado com parafuso Rothoblass® VGS9240 em 45°	74,1
[7]	<i>Eucalyptus grandis</i> (MLC)	Barra de aço nervurada CA-50 Ø12,5 mm em 90°	29,7
		Ganchos de barra de aço nervurado Ø12,5 mm em 45°	75,5
		Entalhe reforçado com barra de aço nervurada CA-50 Ø12,5 mm em 90°	170,0
		Entalhe triangular reforçado com gancho de barra de aço nervurada CA-50 Ø12,5 mm em 45°	96,5
		Entalhe triangular reforçado com barra de aço nervurada CA-50 Ø12,5 mm em 90°	114,3
[8]	<i>Pinus radiata</i> (CLT)	Parafuso SFS VB-48- Ø7,5x100 com ancoragem de 100 mm	77,6
		Barra de CFRP Ø8,0 com ancoragem de 110 mm	110,8
		Barra de GFRP Ø13,0 com ancoragem de 110 mm	144,0
		Chapa metálica com ancoragem de 50 mm	73,4
		Chapa em "T" de CFRP com ancoragem de 50 mm	124,5
		Chapa em "T" de GFRP com ancoragem de 50 mm	143,1

Legenda: CUAD = Concreto de Ultra Alto Desempenho. MLC = Madeira Lamelada Colada. BLC = Bambu Lamelado Colado. CLT = Cross Laminated Timber.

Fonte: Feito pelo autor, com referências de: [1] Soriano (2002); [2] Molina (2008); [3] Miotto (2009); [4] Shan et al. (2022); [5] Du et al. (2019); [6] Santos (2021); [7] Fernandes (2022); [8] Li e Hadigheh (2025).

2.1.4. Resistência

A resistência é definida pela capacidade de força máxima que um conector pode resistir na interface entre a madeira e o concreto. Quando o material não permite a observação de um pico de ruptura, a resistência é definida como a força capaz de produzir um deslizamento igual a 15 mm (Dias *et al.*, 2018). Tendo em vista que a transferência de tensões entre a madeira e o concreto depende da rigidez do conector, como demonstrado na subseção 2.1.2 (p. 43), a resistência é uma propriedade secundária na classificação mecânica de conectores para elementos mistos (Dias, 2005).

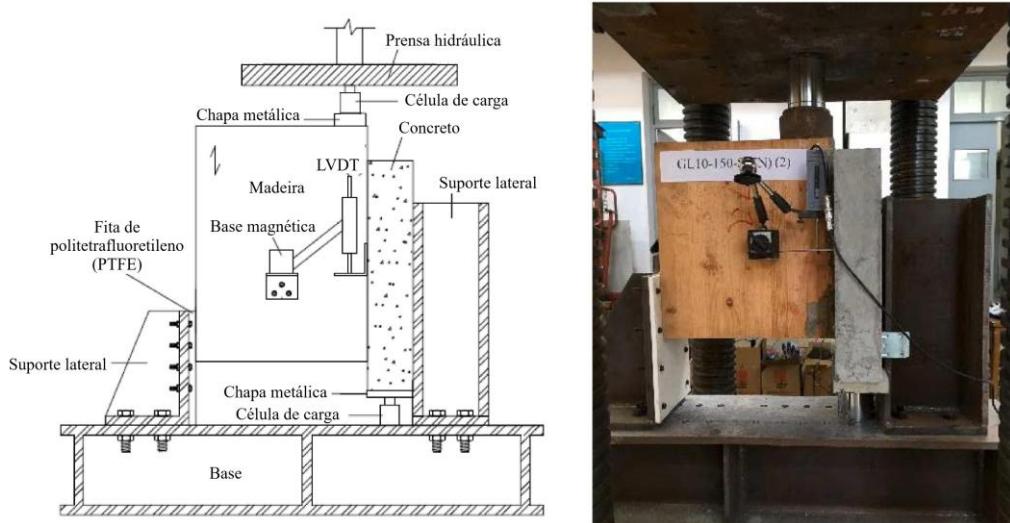
2.1.5. Caracterização dos sistemas de conexão (*push-out test*)

As propriedades de rigidez, representadas pelo módulo de deslizamento, e de resistência, associadas à capacidade de carga dos conectores em sistemas mistos de madeira e concreto, são determinadas por meio do ensaio de cisalhamento das ligações, conhecido como *push-out test*. A partir das curvas força–deslizamento obtidas nesse tipo de ensaio, é possível extrair informações suficientes para o dimensionamento analítico de sistemas mistos. Por essa razão, o *push-out test* é considerado essencial para a caracterização de qualquer sistema de conexão, apresentando a vantagem de demandar menos recursos em comparação aos ensaios em escala real.

Apesar da relevância do *push-out test*, ainda não há uma padronização consolidada para sua execução, e frequentemente os autores divergem quanto aos métodos adotados. De modo geral, duas configurações são mais comumente utilizadas nesse tipo de ensaio: o ensaio de cisalhamento com corte único (Figura 2.6) e o ensaio de cisalhamento com corte duplo (Figura 2.7). Também, a geometria adotada para os corpos de prova pode variar, dependendo da bibliografia.

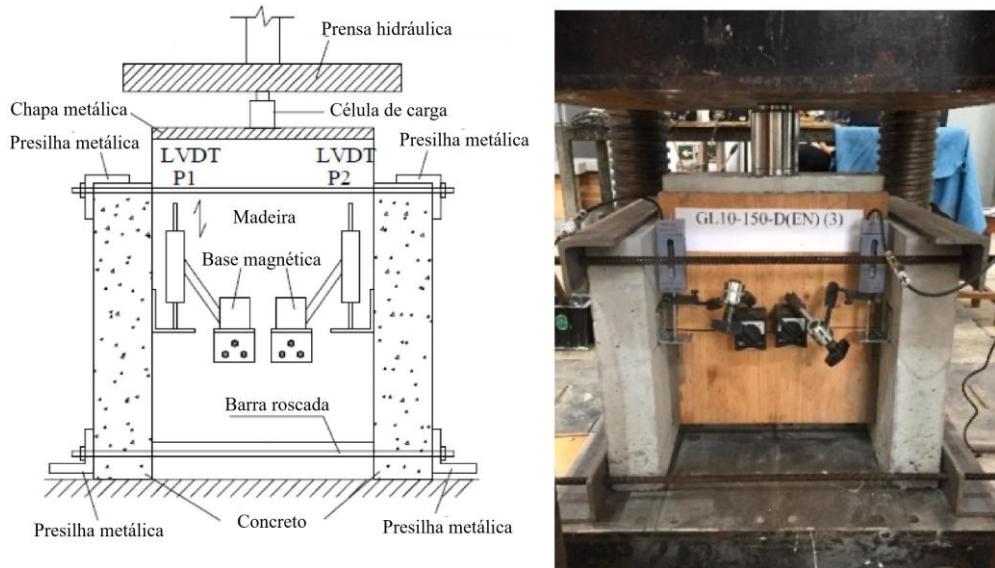
No ensaio de corte duplo, o corpo de prova é composto por três elementos, unidos por uma configuração simétrica com dois sistemas de conexão. Já no ensaio de corte único, o corpo de prova apresenta uma configuração mais próxima da realidade, sendo composto por dois elementos conectados por um único sistema de conexão. Embora o ensaio de corte único represente uma situação estrutural mais verossímil, sua assimetria impõe maiores desafios para a montagem do aparato de ensaio, exigindo cuidados adicionais na aplicação das cargas. A execução do ensaio também não faz considerações sobre a quantidade de conectores adotados no ensaio, sendo comum a adoção de um ou dois conectores em cada lado.

Figura 2.6 – Configuração do *push-out test* para corpos de prova mistos de madeira e concreto: ensaio de corte único.



Fonte: Ling et al. (2023), p. 130244.

Figura 2.7 – Configuração do *push-out test* para corpos de prova mistos de madeira e concreto: ensaio de corte duplo.



Fonte: Ling et al. (2023), p. 130244.

Ainda existe uma variação do corpo de prova com corte duplo, na qual o elemento central é composto por concreto, enquanto as peças laterais são feitas de madeira (Carvalho e Carrasco, 2010). Além da configuração do corpo de prova, o *push-out test* pode variar em outros aspectos, como a geometria do elemento de concreto e o método de aplicação do carregamento. Carvalho e Carrasco (2010) ensaiaram 36 corpos de prova, variando a espessura da camada de concreto e o material do elemento central no ensaio de cisalhamento com corte duplo (madeira ou concreto). Os autores concluíram que a configuração com peça

central de concreto conduziu a resultados inferiores àqueles com peça central de madeira. No entanto, não foi observada influência significativa da espessura da laje de concreto sobre os resultados.

Jiang *et al.* (2023) ensaiaram 36 corpos de prova com sistema de conexão por parafusos inseridos perpendicularmente às fibras da madeira, variando tanto o tipo de corpo de prova (corte único ou duplo) quanto a taxa de carregamento. Os resultados mostraram que os corpos de prova com corte único apresentaram desempenho inferior aos com corte duplo. Além disso, os autores observaram que taxas de carregamento superiores a 2 mm/min tendem a conduzir a valores reduzidos de rigidez. Soriano (2002) avaliou a influência do tratamento superficial da madeira em contato com o concreto sobre as propriedades de rigidez. O autor concluiu que o módulo de deslizamento não é afetado pela presença ou ausência de tratamento na superfície da madeira em contato com o concreto.

A Tabela 2.2 resume os resultados de diferentes autores que ensaiaram sistemas de conexão compostos por parafusos de cabeça sextavada com diâmetro de 12 mm, inseridos perpendicularmente às fibras da madeira. Os dados da tabela evidenciam uma grande variação nos valores de módulo de deslizamento, mesmo entre estudos que utilizaram variáveis experimentais semelhantes. Essa variabilidade ressalta a dificuldade em comparar resultados de ensaios do tipo *push-out test*, especialmente diante da ausência de padronização metodológica.

Tabela 2.2 – Exemplos de ensaios para sistemas de conexão com parafuso de cabeça sextavada com diâmetro de 12 mm.

Ref.	Protocolo de carregamento	Tipo de corpo de prova	l_c (mm)	l_m (mm)	K_{ser} (kN/mm)
[1]	EN 26891:2000	Duplo	40	80	39,7
[2]	EN 26891:2000	Duplo	50	100	11,9
	EN 26891:2000	Duplo	50	120	4,8
	EN 26891:2000	Único	50	120	2,1
[3]	0,5 mm/min	Duplo	50	120	4,4
	2,0 mm/min	Duplo	50	120	4,8
	4,0 mm/min	Duplo	50	120	2,9

Legenda: l_c = comprimento de ancoragem no concreto; l_m = comprimento de ancoragem na madeira; K_{ser} = módulo de deslizamento de serviço.

Fonte: Feito pelo autor, com referências de: [1] He *et al.* (2016); [2] Jiang *et al.* (2017); [3] Ling *et al.* (2023).

2.1.6. Métodos de dimensionamento

Diversos métodos foram apresentados para o dimensionamento de estruturas mistas de madeira e concreto. Cada método tem suas limitações associadas: as condições de carregamento e apoio do sistema estático, a quantidade de variáveis necessárias para alimentar o sistema matemático e a complexidade de cálculo. Dias *et al.* (2018) apresentaram um comparativo de diferentes métodos de dimensionamento, sendo esse comparativo apresentado de forma reduzida no Quadro 2.3. Os itens em amarelo representam a resposta com maior desvantagem em comparação aos outros métodos, segundo os autores.

Quadro 2.3 – Comparativo entre os métodos de dimensionamento de sistemas mistos.

Parâmetro	Equação diferencial	Método γ	Bielo e tração	Shear Analogy	Elementos Finitos
Facilidade de aplicação					
Consumo de tempo	Médio/alto	Baixo	Médio	Médio	Alto
Influência da modelagem nos resultados	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Alto
Complexidade	Médio	Baixo	Médio	Médio	Alto
Método normatizado	Não	Sim	Não	Sim	Não
Abrangência de aplicação					
Nº de camadas	2	3	Sem limites	Sem limites	Sem limites
Camadas de dimensões diferentes	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Materiais com MOE diferentes	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Seção variável	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Material não-linear	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Sistemas curvos	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Em relação aos conectores					
Determina espaçamento	Sim	Aprox.	Sim	Sim	Sim
Variação do conector	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Condições de carregamento					
Distribuição não-uniforme	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Consideração de deformações inelásticas	Sim	Não	Sim	Sim	Sim

Fonte: Dias *et al.* (2018), p. 79–82.

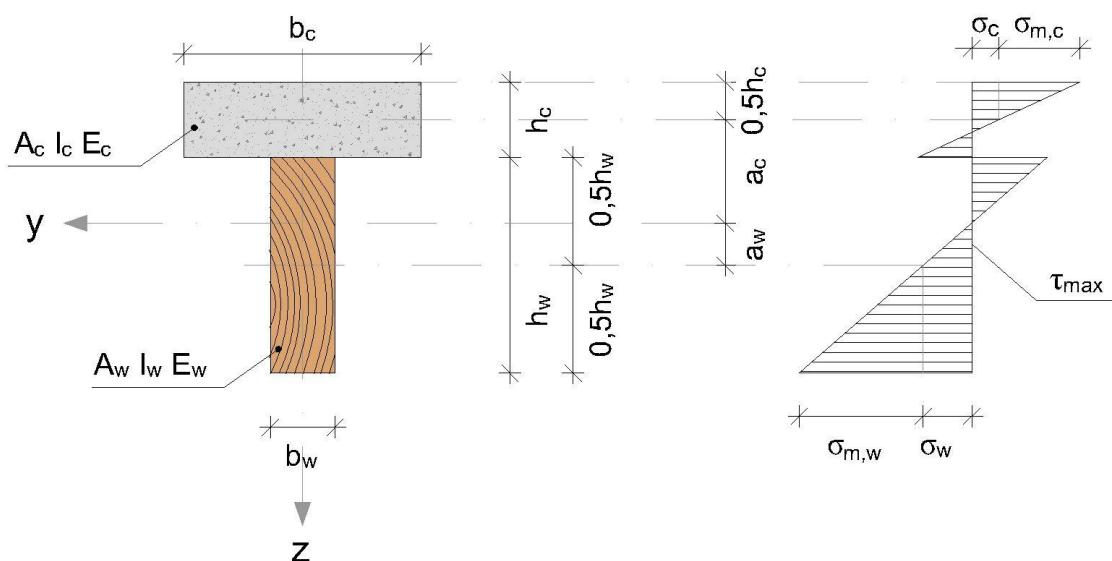
Apesar da desvantagem em relação às suas condições de contorno (abrangência, tipos de conectores e condições de carregamento), o Método γ demonstra baixa complexidade e facilidade de aplicação, o que se configura uma solução prática em escritórios de projeto. Na próxima seção será demonstrado o equacionamento do Método γ presente no Anexo B da norma europeia EN 1995–1 (CEN, 2004b), conhecida como Eurocode 5, maneira da qual a norma será referenciada daqui por diante.

2.1.7. Método γ ou Vigas mecanicamente conjugadas

O Método γ é adotado pelo Eurocode 5 (CEN, 2004b) para a análise de vigas compostas de madeira com seção “I”, “T” ou caixão. O método é baseado no uso do fator γ para reduzir a parcela de inércia transportada da seção composta. Ou seja, quando $\gamma = 1$ não há interrupção nas tensões internas e os materiais estão completamente conectados. Quando o fator $\gamma = 0$, não há transferência de tensões entre os materiais, fazendo com que eles se deformem independentemente. Os limites de γ estão associados aos limites da ação de composição, mostrados na Figura 2.1, apresentadas na seção 2.1.1 (p. 38).

A aplicação do Método γ é limitada às seguintes condições de contorno: as vigas devem ser biapoiadas e as cargas devem ser uniformemente distribuídas. A Figura 2.8 mostra um sistema misto de madeira e concreto em seção “T” e a distribuição teórica das tensões de flexão.

Figura 2.8 – Seção “T” e a distribuição das tensões de flexão de sistema misto de madeira e concreto, de acordo com o Método γ .



Fonte: CEN (2004b).

O dimensionamento dos sistemas mistos de madeira e concreto é feito por uma Rigidez Efetiva à Flexão (EI_{ef}), dada pela Equação (2.5) (CEN, 2004b),

$$EI_{ef} = (E_w I_w + \gamma_w E_w A_w a_w^2) + (E_c I_c + \gamma_c E_c A_c a_c^2) \quad (2.5)$$

- sendo E_w e E_c os módulos de elasticidade da madeira e do concreto;
 I_w e I_c os momentos de inércia da madeira e do concreto;
 γ_w e γ_c os coeficientes de redução da madeira e do concreto;
 A_w e A_c as áreas das seções da madeira e do concreto;
 a_w e a_c as distâncias entre o centroide da madeira e do concreto até a linha neutra da seção total.

As Equações (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9) indicam como são determinados os coeficientes de redução (γ_w e γ_c) e as distâncias entre os centroides das camadas e do centroide da seção total (a_w e a_c) (CEN, 2004b).

$$\gamma_w = 1 \quad (2.6)$$

$$\gamma_c = \left[1 + \frac{\pi^2 E_c A_c s}{K_i \cdot L^2} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

$$a_w = \frac{\gamma_c E_c A_c (h_c + h_w)}{2(\gamma_c E_c A_c + \gamma_w E_w A_w)} \quad (2.8)$$

$$a_c = \frac{(h_c + h_w)}{2} - a_w \quad (2.9)$$

- sendo L o vão teórico;
 s o espaçamento entre os conectores, sendo arbitrário ao projeto;
 K_i o módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) ou último (K_u) do sistema de conexão;
 h_c e h_w a altura da laje de concreto e da viga de madeira, respectivamente;

As tensões normais na flexão são dadas pelas Equações (2.10), (2.11), (2.12) e (2.13) (CEN, 2004b).

$$\sigma_w = \frac{\gamma_w E_w a_w M}{EI_{ef}} \quad (2.10)$$

$$\sigma_c = \frac{\gamma_c E_c a_c M}{EI_{ef}} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{m,w} = \frac{0,5E_w h_w M}{EI_{ef}} \quad (2.12)$$

$$\sigma_{m,c} = \frac{0,5E_c h_c M}{EI_{ef}} \quad (2.13)$$

sendo σ_w e σ_c as tensões normais no centroide da madeira (σ_w) e do concreto (σ_c), respectivamente;
 $\sigma_{m,w}$ e $\sigma_{m,c}$ as tensões normais da flexão da madeira e do concreto, respectivamente;
 M o valor de projeto do momento máximo de projeto atuante na viga composta.

As tensões encontradas devem ser verificadas para os limites de resistência dos materiais, como demonstrado nas Equações (2.14) e (2.15).

$$\sigma_c + \sigma_{m,c} \leq f_{cd} \quad (2.14)$$

$$\sigma_w + \sigma_{m,w} \leq f_{t0,d} \quad (2.15)$$

sendo f_{cd} a resistência de projeto à compressão do concreto;
 $f_{t0,d}$ A resistência de projeto à tração da madeira.

A tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}) na viga de madeira é dada pela Equação (2.16) (CEN, 2004b),

$$\tau_{max} = \frac{0,5(E_w b_w h_w^2)}{b_w EI_{ef}} \quad (2.16)$$

A força máxima aplicada no conector é dada pela Equação (2.17) (CEN, 2004b),

$$F_{max} = \frac{\gamma_c E_c A_c a_c s}{EI_{ef}} \cdot V \quad (2.17)$$

sendo V o esforço cortante máximo de projeto atuante na viga composta.

De maneira teórica, é possível determinar um limite máximo e um limite mínimo para a rigidez efetiva à flexão, dados pelas Equações (2.18) e (2.19).

$$EI_\infty = (E_w I_w + E_w A_w a_w^2) + (E_c I_c + E_c A_c a_c^2) \quad (2.18)$$

quando $\gamma_w = \gamma_c = 1$

$$EI_0 = (E_w I_w) + (E_c I_c) \quad (2.19)$$

quando $\gamma_w = \gamma_c = 0$

Desta forma, a eficiência (E) da ação de composição nos sistemas mistos pode ser medida pela Equação (2.20).

$$E(\%) = \frac{EI_{ef} - EI_0}{EI_\infty - EI_0} * 100 \quad (2.20)$$

sendo EI_{ef} a rigidez efetiva dada pela Equação (2.5);

2.1.8. Considerações sobre as estruturas mistas

A inovação nos sistemas de conexão para estruturas mistas de madeira e concreto permanece como um tema promissor no meio acadêmico (Quadro 2.2), estimulando a busca por alternativas que apresentem resistência e rigidez compatíveis com os conectores consolidados, como os metálicos. Além dos requisitos mecânicos, os estudos mais recentes têm associado critérios de custo, racionalização do uso de materiais e a incorporação de recursos renováveis, visando ao desenvolvimento de sistemas com desempenho estrutural superior e maior sustentabilidade.

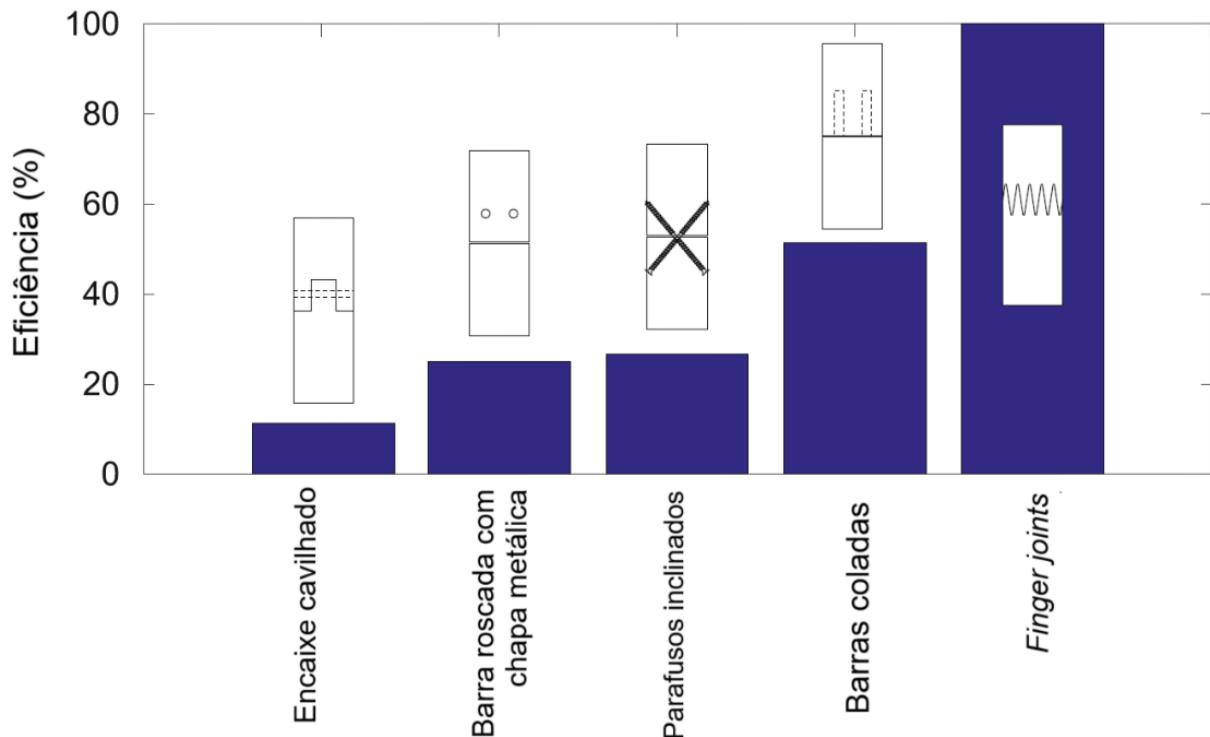
Apesar da popularidade do tema, a ausência de normas específicas para a realização de ensaios de cisalhamento dos conectores (*push-out tests*) representa um desafio para a padronização dos resultados entre diferentes estudos. De maneira geral, o ensaio com corte duplo tem sido amplamente adotado por pesquisadores para a determinação do módulo de deslizamento e da capacidade de carga dos conectores. Esses parâmetros são essenciais para a análise analítica do comportamento dos sistemas mistos.

Na revisão do estado da arte sobre sistemas de conexão em estruturas mistas de madeira e concreto, observa-se que, até o momento, não há registros da aplicação de cavilhas engenheiradas como alternativa de conector nesses sistemas. Essa lacuna reforça a relevância da presente pesquisa como contribuição original ao estudo de ligações em estruturas mistas de concreto e madeira.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DE CONECTORES DE MADEIRA

As ligações entre os elementos estruturais são componentes críticos para a transferência de esforços de uma construção em madeira. Os conectores para estruturas de madeira podem ser classificados em dois grupos, sendo eles: os conectores por penetração, como parafusos e cavilhas, e os conectores por aderência. Ramage *et al.* (2017) apresentaram um conceito de eficiência das ligações definido como a razão entre a resistência à tração da conexão e a resistência à tração do elemento de madeira conectado. Após uma série de ensaios, os autores publicaram um comparativo entre alguns tipos de ligações. A Figura 2.9 ilustra a eficiência dos conectores pesquisados.

Figura 2.9 – Eficiência de algumas conexões entre elementos de madeira de 100 mm por 200 mm para o esforço de tração axial.



Fonte: Ramage *et al.* (2017), p.18.

Os conectores por aderência (barras coladas e *finger joints*) são mais eficientes quando comparados com os demais conectores por penetração. No entanto, apesar da elevada resistência mecânica, os autores ressaltam que a complexidade de execução das ligações coladas torna a solução limitada a apenas algumas aplicações na prática. Em relação aos conectores mecânicos, pode ser citado que a facilidade de execução e o baixo custo tornam esta solução mais amplamente utilizada nas estruturas em madeira.

Apesar do estudo de Ramage *et al.* (2017) apresentar as ligações cavilhadas como menos eficientes, os autores apontam que a escolha por conectores cavilhados é vantajosa por conceber uma estrutura com menor quantidade de aço e agrega um caráter mais sustentável à estrutura. Adicionalmente, cabe ressaltar que a pesquisa se limitou à comparação pelo ensaio de tração axial. Recentemente, algumas pesquisas buscaram desenvolver conectores cavilhados como uma alternativa mais sustentável para as estruturas em madeira em situações de solicitações diferentes à de tração (Mehra, 2020; Namari *et al.*, 2021; O'Ceallaigh *et al.*, 2021).

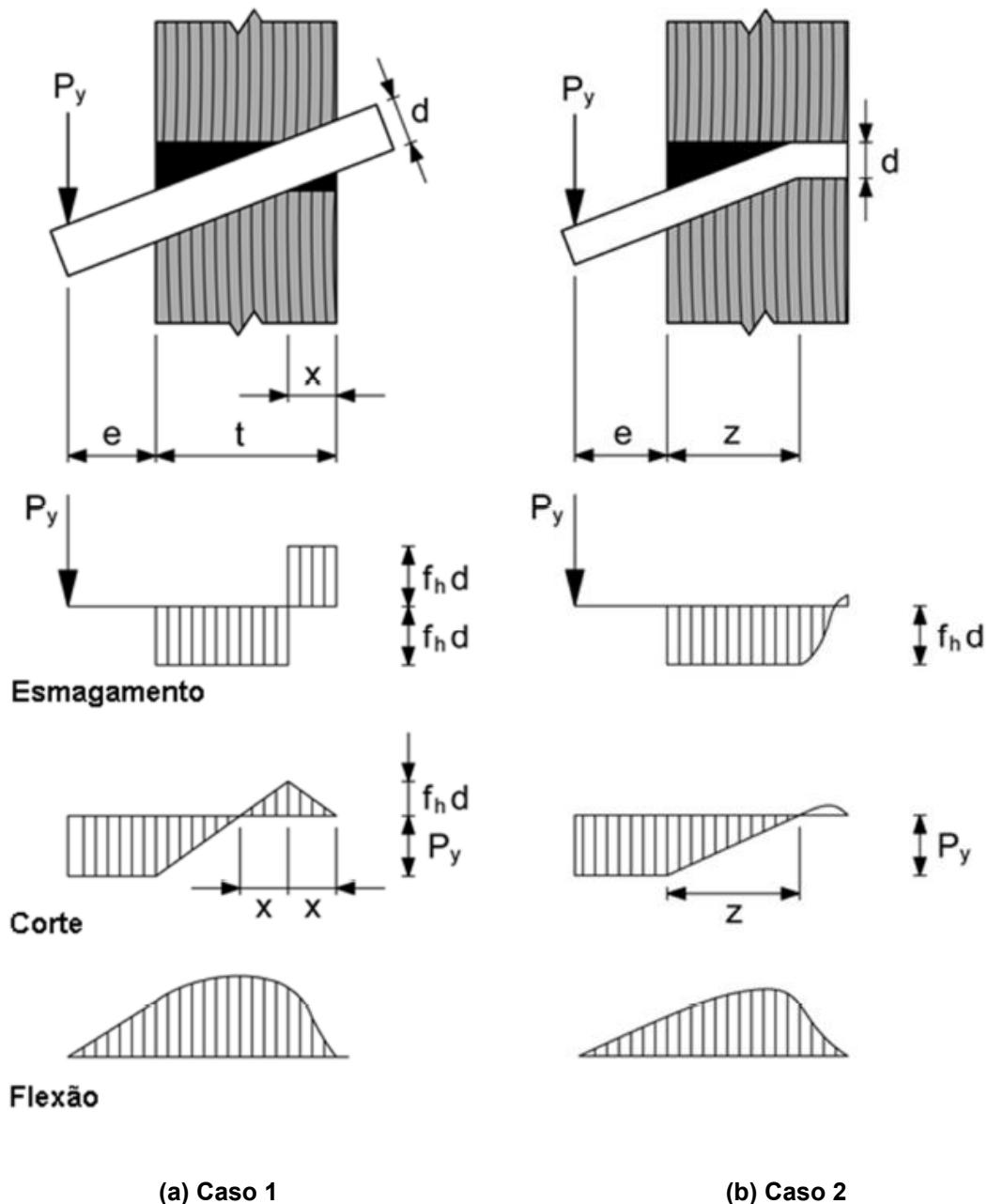
Os conectores do tipo cavilha podem ser caracterizados como pinos mecânicos de madeira, de maneira que o funcionamento dessas ligações pode ser explicado pela Teoria do Escoamento, iniciada por Johansen (1949). Atualmente, a teoria do escoamento foi modernizada e incorporada ao Modelo Europeu de Escoamento (*European Yield Model – EYM*), que serve de base teórica na norma europeia EN 1995-1 (CEN, 2004b) e na norma brasileira NBR 7190-1 (ABNT, 2022) para o dimensionamento de pinos. Cabe ressaltar que a versão anterior da NBR 7190 (ABNT, 1997) apresentava um modelo de cálculo, baseado no EYM, específico para cavilhas. As próximas subseções tratarão sobre o modelo EYM, as propriedades fundamentais para o modelo e um estado da arte acerca o desenvolvimento de conectores cavilhados e suas aplicações.

2.2.1. *Modelo Europeu de Escoamento (EYM)*

O Modelo Europeu de Escoamento, conhecido como EYM, teve início com os estudos publicados por Johansen (1949), ocasião em que foi apresentado um método simples para o dimensionamento de conectores com barras metálicas. Anos depois, diversos estudos complementaram a Teoria de Johansen, levando em consideração variáveis como o diâmetro do pino, as dimensões dos apoios e os materiais componentes da ligação. Assim, o EYM se estabeleceu como uma teoria geral confiável para o dimensionamento de ligações de madeira com pinos mecânicos, como por exemplo: parafusos, barras roscadas passantes, pregos e cavilhas.

O EYM é baseado na observação experimental dos modos de ruptura e no equilíbrio das forças no Estado Limite Último da ligação. A Figura 2.10 ilustra, de maneira simplificada, os modos de rupturas típicos para ligações de corte simples com pinos em madeira, no qual se baseia o EYM. O caso 1 ilustra a hipótese de esmagamento localizado da madeira causada pela rotação do pino com rigidez muito superior ao da madeira. O caso 2 ilustra a ruptura por um efeito combinado da flexão do pino e do esmagamento localizado da madeira.

Figura 2.10 – Modos de ruptura típicos e simplificados de ligações com pinos de madeira em peças de corte simples.



FONTE: Thomson (2010), p.17.

A força externa (P_y) é equilibrada pela resistência ao esmagamento da madeira, expressa pelo produto entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino ($f_h d$). No caso 1 (Figura 2.10a), a ruptura ocorre pela rotação do pino, de forma que o eixo está localizado em um ponto de distância x da extremidade da madeira. Neste caso, presume-se que o pino é composto por um material rígido, de forma que suas deformações sejam desconsideradas,

e a madeira tenha um comportamento rígido-plástico ao esmagamento localizado. Dessa forma, o equilíbrio de forças verticais e momentos do sistema é dado pela Equação (2.21).

$$P_y = \left[\sqrt{(t + 2e)^2 + t^2} - (t - 2e) \right] f_h d \quad (2.21)$$

sendo P_y a força externa aplicada na extremidade do conector;

t a espessura da peça de madeira;

e a excentricidade da força P_y ;

f_h a resistência ao embutimento;

d o diâmetro do pino.

No caso 2 (Figura 2.10b), o momento máximo do sistema é superior à resistência ao momento de plastificação do conector (M_y). Assumindo que não há efeito de atrito entre a madeira e conector, a força máxima (P_y) de resistência da ligação é dada pela Equação (2.22).

$$P_y = \left[\sqrt{e^2 + \frac{2M_y}{f_h d}} - e \right] f_h d \quad (2.22)$$

As Equações (2.21) e (2.22) são a base de todas as equações do EYM, consequentemente, todas as equações presentes em normas nacionais e internacionais são evoluções dessas equações. A resistência máxima da ligação é definida pelo menor valor de P_y calculado entre as equações que representam cada possibilidade de modo de ruptura. As normas atuais fazem uma consideração do efeito do atrito, definido como resistência ao arrancamento (f_{ax}), considerando uma parcela adicional de resistência ao cálculo.

Por fim, esta subseção tem como intenção demonstrar as premissas básicas de resistência de uma ligação em corte simples. A seguir, serão demonstradas as principais técnicas adotadas atualmente para a determinação das propriedades do conector, sendo elas: a resistência ao embutimento (f_h), a resistência ao arrancamento (f_{ax}) e o momento resistente de plastificação (M_y).

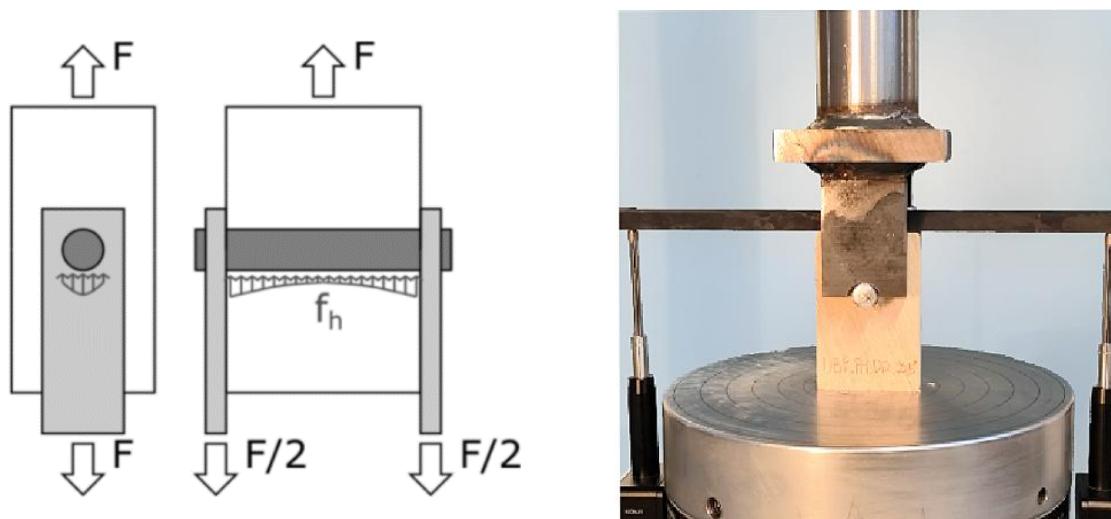
2.2.2. Resistência ao embutimento (f_h)

Ao longo do século XX, diversos estudos foram conduzidos para normatizar as técnicas de determinação da resistência de embutimento da madeira. De maneira geral, as normas diferem significativamente na relação da resistência ao embutimento com demais propriedades da madeira e critérios de determinação de pontos de interesse. No entanto, em

relação às técnicas de ensaios, duas principais técnicas são observadas: o teste de furo inteiro (FI) e o teste de meio furo (MF) (Ottenhaus, Li e Crews, 2022) (Figura 2.11).

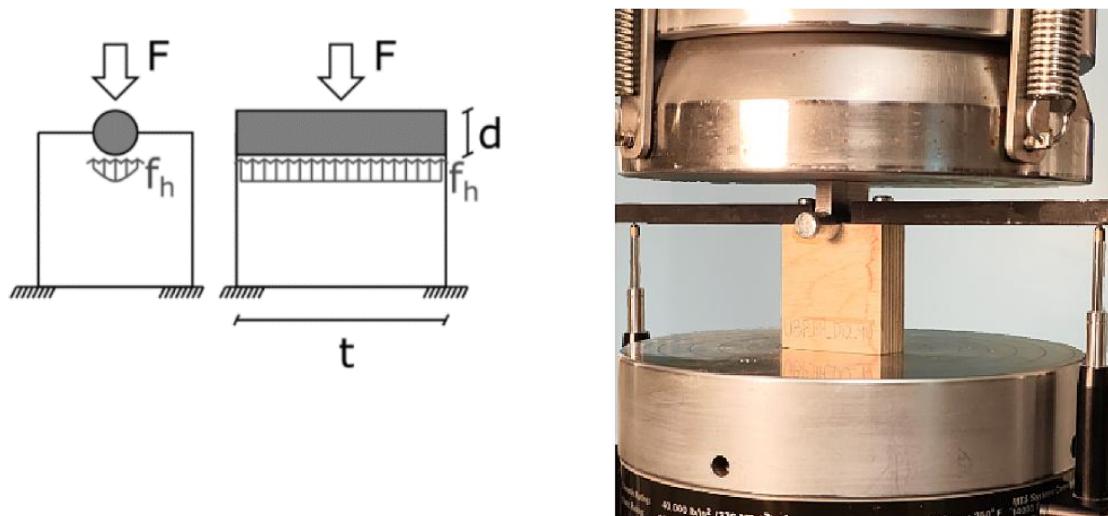
O teste de furo inteiro é feito com um pino embutido na madeira solicitado por duas chapas metálicas nas suas extremidades por compressão ou tração, resultando em uma distribuição parabólica de tensões (Figura 2.11). O teste de meio furo é feito por um pino solicitado por compressão, resultando em uma distribuição uniforme de tensões (Figura 2.12). De modo geral, o ensaio de furo inteiro representa com maior fidelidade as tensões localizadas que ocorrem em ligações em estruturas reais.

Figura 2.11 – Ensaio de furo inteiro (FI) para determinação da resistência ao embutimento.



Fonte: Ottenhaus *et al.*, 2022, p. 128130 e Wang *et al.* (2023), p. 131440.

Figura 2.12 – Ensaio de meio furo (MF) para determinação da resistência ao embutimento.

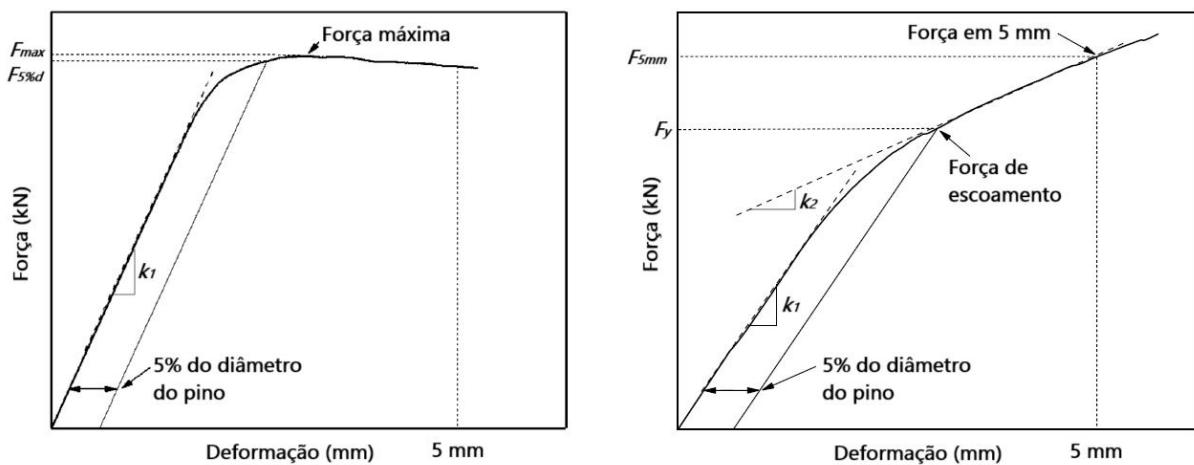


Fonte: Ottenhaus *et al.*, 2022, p. 128130 e Wang *et al.* (2023), p. 131440.

Em relação à abrangência dos dois tipos de ensaio, a norma brasileira NBR 7190-3 (ABNT, 2022) e a norma europeia EN 383 (CEN, 2007) prescrevem a utilização do ensaio de furo inteiro para a determinação da resistência ao embutimento. Já a norma norte-americana ASTM D5764 (ASTM, 2023) permite a aplicação tanto do ensaio de furo inteiro quanto do ensaio de meio furo.

Uma das principais diferenças entre essas normas está relacionada ao critério adotado para definição da força resistente ao embutimento. A NBR 7190-3 (ABNT, 2022) e a EN 383 (CEN, 2007) recomendam considerar a força máxima (F_{max}) ou a força correspondente a um deslocamento relativo igual a 5 mm (F_{5mm}). Por outro lado, a ASTM D5764 (ASTM, 2023) adota como referência a força associada a um deslocamento residual igual a 5% do diâmetro do pino ($F_{5\%d}$). A Figura 2.13 ilustra os pontos de forças são considerados para a determinação da resistência ao embutimento, de acordo com diferentes normas.

Figura 2.13 – Curvas força–deformação e os parâmetros para determinação da resistência ao embutimento.



Fonte: Xu et al. (2023), p. 370.

Independentemente da norma consultada, a resistência ao embutimento (f_h) é dada pela Equação (2.23). De acordo com o Eurocode 5 (CEN, 2004b), a resistência ao embutimento pode ser determinada em função do diâmetro do pino e da densidade da base da madeira, como demonstrado na Equação (2.24).

$$f_h = \frac{F}{t \cdot d} \quad (2.23)$$

em que F é a força resistente ao embutimento, dada por: F_{max} , F_{5mm} ou $F_{5\%d}$;

$$f_h = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (2.24)$$

sendo ρ_k é a densidade aparente da base de madeira.

O Quadro 2.4 resume os achados da bibliografia em relação às variáveis do diâmetro do pino, do ângulo que a força é aplicada em relação às fibras, ao tipo de teste e a consideração da força para a determinação da resistência ao embutimento de peças de madeira.

Quadro 2.4 – Resumo da influência das variáveis do ensaio de embutimento.

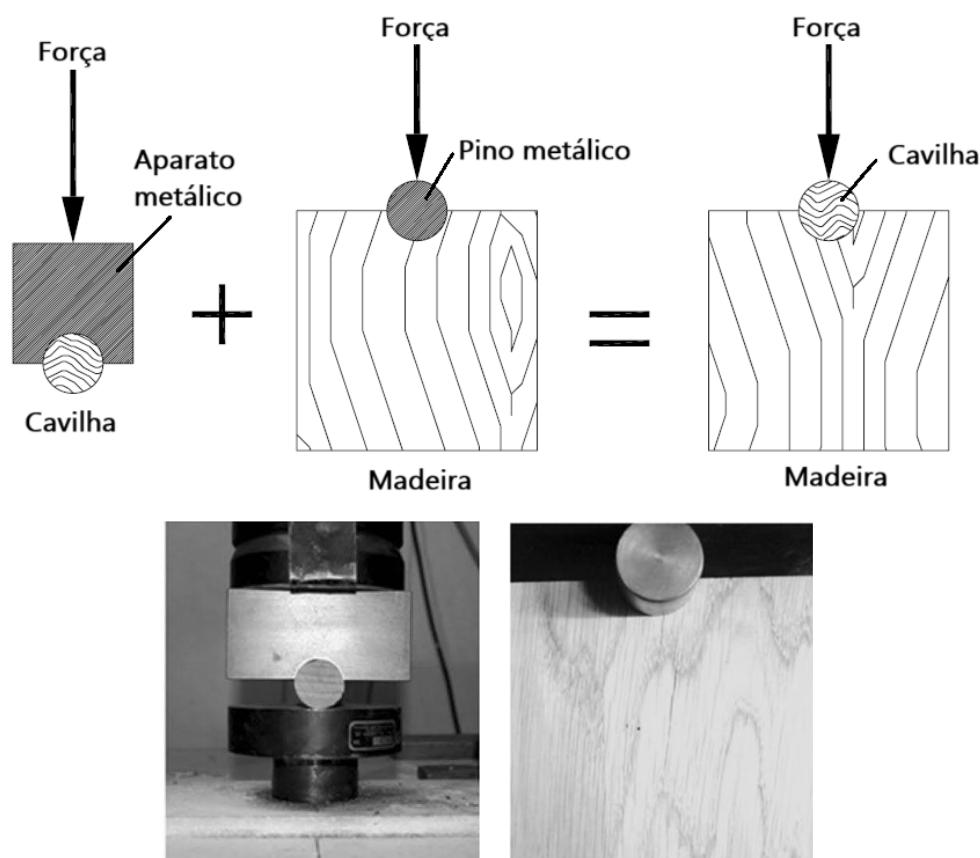
Ref.	Variável	Principais conclusões
[1, 2, 3, 4]	<i>Diâmetro do pino</i>	Para alguns autores, considerando um conector do mesmo tipo e material, o diâmetro do pino tem pouca influência no valor da resistência ao embutimento (f_h). Entretanto, Almeida (2014) encontrou que o valor de resistência de embutimento aumenta em função do diâmetro.
[1, 5, 6]	<i>Ângulo da força em relação às fibras</i>	A menor resistência ao embutimento da madeira ocorre com a aplicação da força perpendicular às fibras da madeira e aumenta exponencialmente até o valor máximo quanto aplicada paralela em relação às fibras da madeira.
[1, 2, 7, 8]	<i>Tipo de teste (FI ou MF)</i>	Devido à diferença na distribuição das tensões, o teste FI oferece resultados médios superiores ao teste MF, apesar de pouca diferença estatística.
[2, 4, 8]	<i>Força (F_{max}, F_{5mm} ou $F_{5\%d}$)</i>	Os resultados se contradizem na bibliografia, tendo resultados diferentes dependendo do ângulo das fibras, tipo de ensaio e os materiais do pino e da madeira. Nas referências consultadas, os valores de $F_{5\%d}$ são inferiores aos valores de F_{5mm} .
[9, 10]	<i>Superfície do pino</i>	Utilizar pinos de superfície nervurada ou lisa não tem influência significativa no valor de resistência ao embutimento.
Legenda: FI = Ensaio de furo inteiro. MF = Ensaio de meio furo. $F_{5\%d}$ = força associada a um deslocamento residual igual a 5% do diâmetro do pino. F_{5mm} = força correspondente a um deslocamento relativo igual a 5 mm. F_{max} = força máxima.		

Fonte: Feito pelo autor, com referências de: [1] Sawata e Yasumara (2002); [2] Wang *et al.* (2023); [3] Mirdad *et al.* (2022); [4] Almeida (2014); [5] Schneid e Moraes (2021); [6] Khan *et al.* (2021); [7] Franke e Magnière (2014); [8] Ottenhaus *et al.* (2022); [9] Xu *et al.* (2023); [10] Khan *et al.* (2021).

A bibliografia citada no Quadro 2.4 converge em relação ao tipo de pino, sendo todos os ensaios realizados com parafusos metálicos. Os estudos abrangem peças de madeira de alta e baixa densidade, o que permite cobrir uma gama significativa de variáveis associadas à resistência ao embutimento em conectores metálicos. Nesse contexto, o conhecimento sobre o embutimento em peças serradas de madeira com conectores metálicos já se apresenta relativamente consolidado na literatura. Por outro lado, o estudo da resistência ao embutimento com o uso de conectores cavilhados de madeira ainda é limitado, e pouco avanço tem sido registrado nesse campo ao longo do tempo.

Schmidt e Daniels (1999) afirmam que como os conectores metálicos possuem a rigidez até 20 vezes maior que a da madeira, se pode considerar que as deformações dos ensaios são apenas da madeira. No entanto, os autores demonstraram experimentalmente que, para conectores cavilhados de madeira, os resultados são comprometidos pelas deformações por esmagamento da cavilha. Os autores desenvolveram um novo método que consiste em ensaiar a cavilha em situação de confinamento parcial à compressão, e separadamente, ensaiar a peça de madeira ao embutimento de um pino metálico. A soma dos gráficos tensão-deformação deve ser considerada como o resultado (Figura 2.14).

Figura 2.14 - Proposta de Schmidt e Daniels (1999) para ensaio de embutimento para cavilhas de madeira.



Fonte: Miller et al. (2010), p. 1259 e Ceraldi et al. (2017), p. 961.

Jeong e Kong (2018) testaram cavilhas feitas de madeira de freixo chinês (*Fraxinus rhynchophylla*) e cedro japonês (*Cryptomeria japonica*) de acordo com o modelo de Schmidt e Daniels (1999) e compararam com o procedimento da ASTM D5764 (ASTM, 2023). De acordo com os autores, a resistência ao embutimento determinada pelo método norte-americano é inferior quando comparada com o modelo de Schmidt e Daniels (1999). Portanto, apesar de não representar um modelo exato, o procedimento norte-americano resulta em valores a favor da segurança, sendo uma metodologia adequado para cavilhas de madeira.

Mehra (2020) produziu cavilhas densificadas de cicuta (*Tsuga heterophylla*), pinho (*Pinus sylvestris*) e abeto (*Pseudotsuga menziesii*). A densidade das madeiras densificadas foi de 1178,3 kg/m³, 1423,2 kg/m³ e 1503,6 kg/m³, respectivamente para cada espécie. O autor mostrou que o modelo da ASTM D5764 (ASTM, 2023) é satisfatório para a determinação da resistência ao embutimento quando avaliadas cavilhas com madeiras de alta densidade, pois os resultados encontrados experimentalmente foram validados a partir de modelos teóricos.

Miller *et al.* (2010) alertaram que o embutimento de cavilhas de madeira deve considerar um modo adicional de falha, caracterizado pelo surgimento de múltiplas fissuras por cisalhamento, ocorrendo paralelamente às fibras da madeira. Os autores propuseram uma nova equação a ser incorporada nas normativas, visando contemplar esse novo modo de ruptura. Vilguts *et al.* (2024) avaliaram o comportamento ao embutimento de cavilhas de madeira fabricadas com quatro espécies de dicotiledôneas, aplicadas em elementos de CLT. Os autores observaram que o método prescrito pela norma ASTM D5764 (ASTM, 2023) tende a subestimar os valores de resistência ao embutimento, o que pode levar ao superdimensionamento das estruturas.

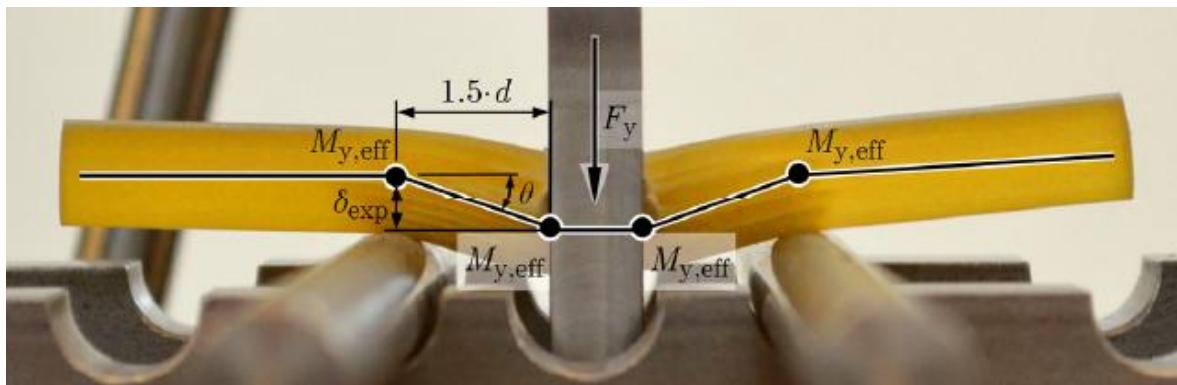
2.2.3. Momento resistente de plastificação (M_{pl})

O momento resistente de plastificação é uma propriedade mecânica fundamental para a caracterização de conectores em ligações de madeira, o qual representa a capacidade de um conector resistir à solicitação de flexão (Mehra, 2020). A norma europeia EN 409 (CEN, 2009) descreve o procedimento de determinação desta propriedade a partir do ensaio de flexão de quatro pontos de um conector metálico.

Mehra (2020) afirma que o método da norma EN 409 (CEN, 2009) não é representativo para os esforços de flexão quando aplicado em cavilhas, pois a baixa rigidez da madeira no cisalhamento conduz à ruptura por cisalhamento transversal do conector. Thomson (2010) identificou as limitações da caracterização a partir da norma EN 409 (CEN), propondo um método alternativo que posteriormente foi utilizado nas demais pesquisas sobre cavilhas de madeira (Jockwer *et al.*, 2018; Mehra, 2020; Frontini *et al.*, 2020; Namari *et al.*, 2021).

O método de Thomson (2010) é baseado na igualdade entre a energia dissipada pelo sistema com quatro rótulas plásticas e o trabalho da força aplicada em uma cavilha submetida à flexão em um vão suficientemente curto. O procedimento de Thomson (2010) também é referido como “método da viga curta”. A Figura 2.15 ilustra uma cavilha deformada após o fim do ensaio.

Figura 2.15 – Deformação plástica típica para cavilhas de madeira.



Fonte: Palma et al. (2016), p. 208, adaptado de Thomson (2010).

A Equação (2.25) demonstra a estimativa do momento resistente de plastificação a partir do método da viga curta (Thomson, 2010).

$$4M_{y,eff} \cdot \theta = F_y \cdot \delta_{exp} \rightarrow M_{eff} = \frac{3}{8} F_y \cdot d \quad (2.25)$$

sendo $M_{y,eff}$ é o momento resistente de plastificação;

θ é o ângulo de rotação das rótulas plásticas, aproximado para pequenos vãos como $\theta = \delta_{exp}/1,5d$.

δ_{exp} Deslocamento do meio do vão experimental

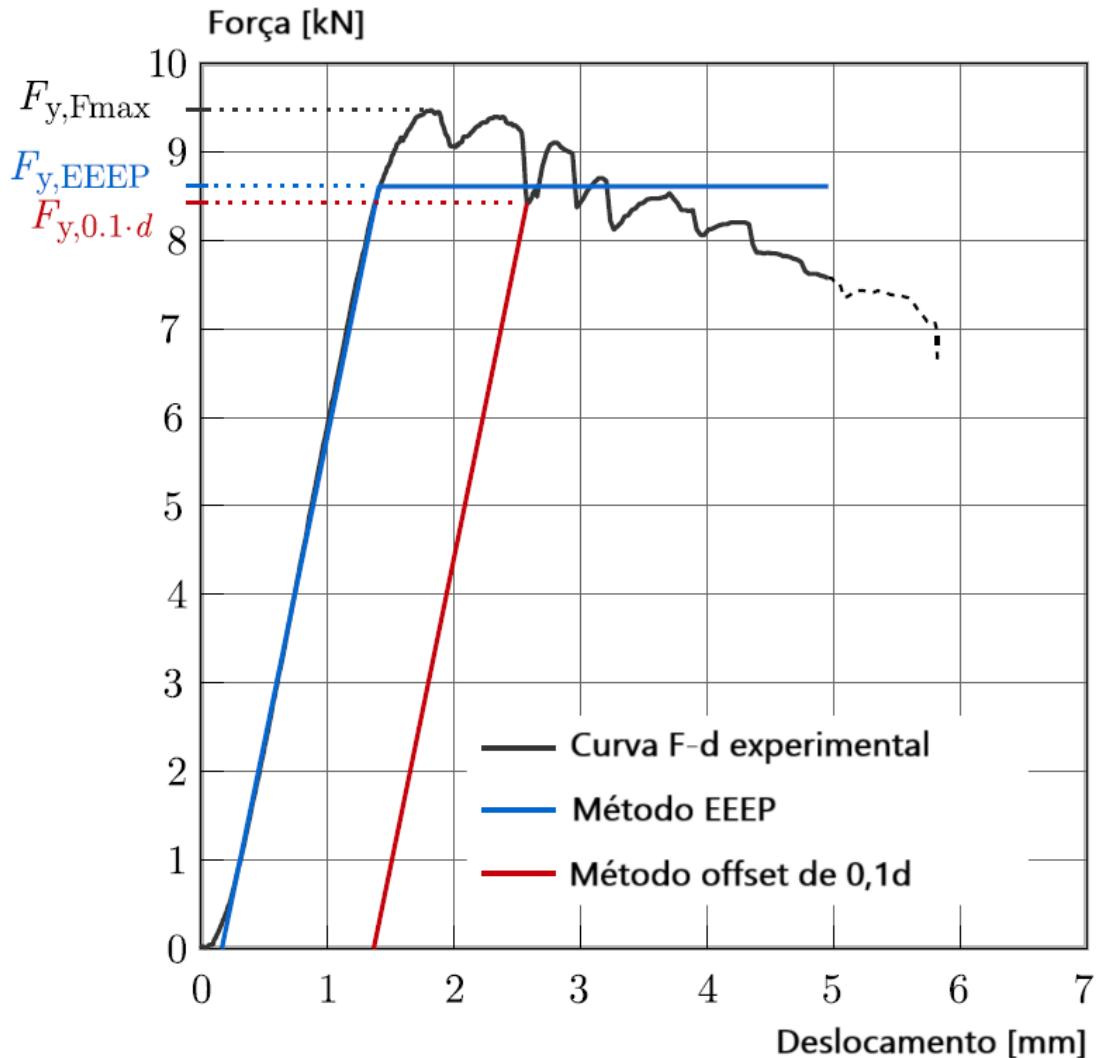
F_y é a força de escoamento;

d é o diâmetro da cavilha.

Para Thomson (2010), a força de escoamento (F_y) é determinada pela intersecção de uma reta que representa um deslocamento residual de 10% do diâmetro do pino paralela à reta da zona elástica do material. Palma et al. (2016) mostraram que este método é desvantajoso, pois a região em que a força deve ser considerada possui mudanças abruptas nas curvas de força-deslocamento. Estes autores utilizaram o método da energia equivalente da curva elasto-plástica (EEEP).

O método EEEP ajusta a curva força-deslocamento real do material para uma curva bilinear com uma zona elástica e outra perfeitamente plástica. A energia dissipada da curva bilinear ajustada, ou seja, a área abaixo da curva, deve ser igual a área da curva real determinada pelo ensaio. A Figura 2.16 ilustra um exemplo de como determinar a força F_y a partir dos dois métodos discutidos, demonstrando que o método EEEP conduz a resultados mais precisos para o caso de cavilhas.

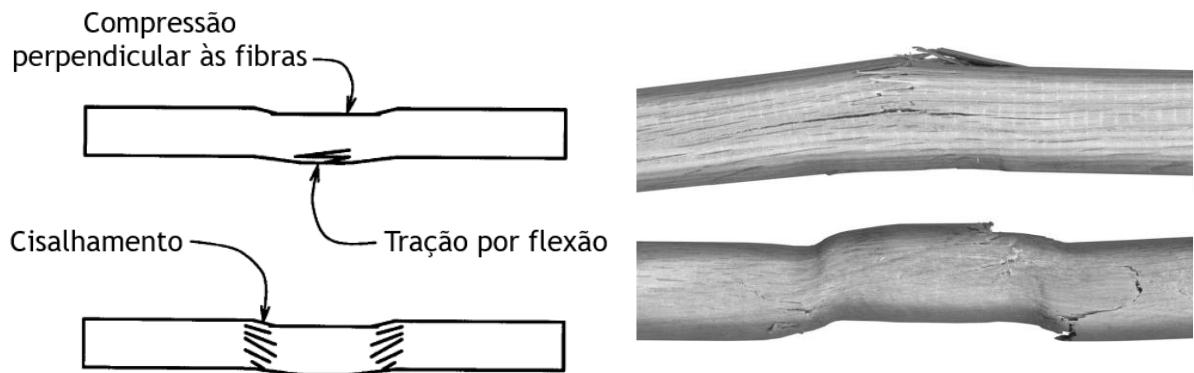
Figura 2.16 – Exemplo de curva força (F) - deslocamento (d) com dois métodos diferentes para determinação da força (F_y).



Fonte: Palma et al. (2016), p. 208.

Mehra (2020) afirma que os modos de ruptura de pinos submetidos à flexão resultam da combinação dos efeitos de compressão perpendicular às fibras (embutimento), flexão e cisalhamento (Figura 2.17). Esse conjunto de mecanismos pode conduzir a formas de ruptura distintas daquelas ilustradas na Figura 2.15. Em estudo mais recente, Mehra et al. (2024) testaram um pórtico de madeira com ligações formadas por cavilhas densificadas. A análise estrutural do pórtico foi conduzida com base na capacidade de momento resistente das cavilhas, estimada por meio do método da viga curta, resultando em uma boa correlação entre os valores analíticos e os resultados experimentais.

Figura 2.17 – Modos de ruptura de cavilhas de madeira submetidas aos ensaios de flexão.

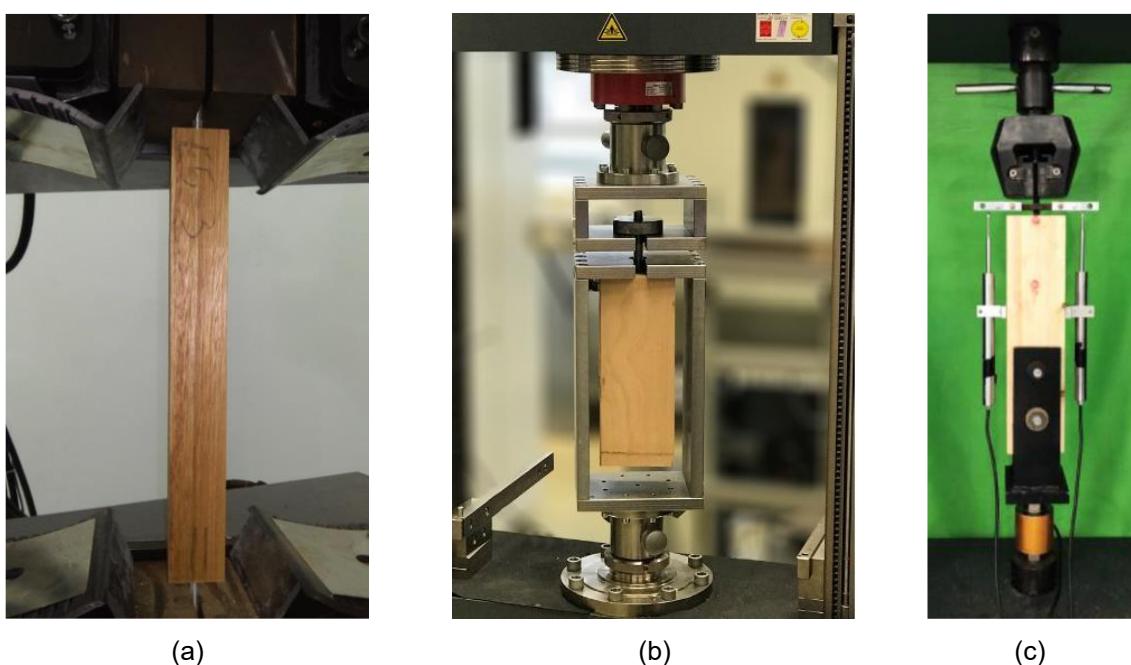


Fonte: Mehra (2020), p. 45; Miller *et al.* (2010), p.1257.

2.2.4. Resistência ao arrancamento (f_{ax})

Em conectores por pinos sob corte simples, a resistência ao arrancamento é um efeito secundário que confere uma resistência adicional nas ligações devido ao atrito do conector com a madeira (Thomson, 2010). O arrancamento de barras coladas em madeira é influenciado pelo tipo de adesivo, o comprimento de ancoragem e a espessura da linha de cola (Pigozzo, 2004). A determinação da resistência ao arrancamento pode ser feita a partir de diversos procedimentos encontrados na bibliografia, por exemplo: o teste de tração pura da barra (Figura 2.18a), o teste de tração da barra combinada com compressão da madeira (Figura 2.18b) e o teste de tração da barra e ancoragem da madeira (Figura 2.18c).

Figura 2.18 – Representação de tipos de ensaio de arrancamento: (a) tração pura, (b) tração da barra e compressão da madeira e (c) tração da barra com ancoragem da madeira.



Fonte: (a) Dias (2015), p. 69; (b) Ratsch *et al.* (2019), p. 203; (c) Xu *et al.* (2023), p. 3.

O ensaio de arrancamento de cavilhas é relativamente recente e envolve diversas variáveis ainda pouco exploradas na literatura. Jung *et al.* (2010) produziram cavilhas com madeira densificada de cedro-japonês (*Cryptomeria japonica*) e as compararam com cavilhas de bordo (*Acer spp.*), coladas com adesivo de base poliuretano e submetidas a um ambiente de alta umidade. Os autores concluíram que a menor capacidade hidrofílica da madeira densificada contribuiu para que a resistência da ligação nesse grupo fosse 1,6 vezes superior àquela observada em cavilhas de madeira não densificada de bordo.

Koizumi *et al.* (2001) apontaram a dificuldade de estabelecer critérios para prever a resistência ao arrancamento com base no tipo de adesivo (poliuretano ou epóxi), uma vez que há grande diversidade de formulações dentro desses grupos. Kauffman *et al.* (2018), por sua vez, destacaram que a resistência ao arrancamento varia significativamente em função da umidade do ambiente, especialmente quando se utilizam adesivos de base natural, como caseína e gluteína.

Xu *et al.* (2023) compararam cavilhas de madeira densificada da espécie *Populus spp.* com barras de aço em diferentes comprimentos de ancoragem, ambas coladas com adesivo epóxi. Os autores concluíram que há pouca diferença na resistência ao arrancamento de cavilhas de madeira e barras de aço com o mesmo diâmetro e comprimento de ancoragem. Os valores de resistência ao arrancamento aumentam com maiores valores de comprimento de ancoragem.

2.2.5. Estado da arte sobre o desenvolvimento de cavilhas

O desenvolvimento de cavilhas modernas tem se baseado em processos que modificam as propriedades físicas e mecânicas da madeira original, com o objetivo de ampliar sua aplicação como elemento de ligação estrutural. Esses processos incluem, por exemplo, o reforço com fibras, a impregnação com polímeros, bem como modificações químicas e anatômicas da estrutura celular da madeira. Jung *et al.* (2010) destacam que tais modificações permitem superar limitações naturais da madeira, como sua higroscopidez e baixa resistência ao cisalhamento, tornando o material mais adequado para uso em sistemas de conexão em estruturas mistas.

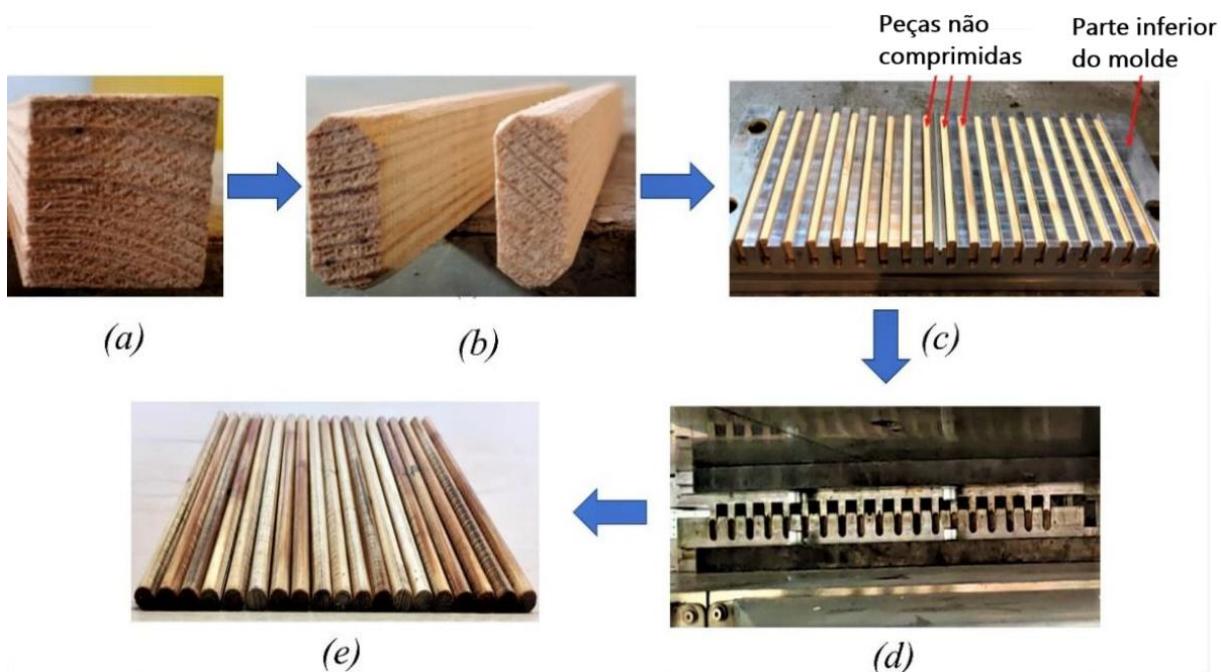
Os trabalhos recentes encontrados na bibliografia sobre cavilhas tiveram o objetivo de desenvolver produtos com melhores características, com intenção de substituir as conexões metálicas. As pesquisas recentes buscaram produzir cavilhas com: madeira densificada, madeira reforçada com alumínio, impregnação de polímero e com madeira microlaminadas colada (LVL).

2.2.5.1 Cavilhas de madeira densificadas

Mehra (2020) produziu cavilhas a partir de madeira de *Pinus sylvestris*, uma espécie de conífera com densidade média variando entre 500 kg/m³ e 600 kg/m³, utilizando um processo de densificação termomecânica (Figura 2.19). O teor de umidade inicial das amostras variou entre 10% e 15%. A madeira foi então submetida à compressão no sentido radial, sob temperatura controlada de até 130°C e pressão constante ao longo de três horas (Figura 2.19a e Figura 2.19b).

Após essa etapa, as amostras foram transferidas para um molde semicilíndrico (Figura 2.19c) e novamente comprimidas, agora em alta temperatura, até adquirirem seção circular com 10 mm de diâmetro (Figura 2.19d). Ao final do processo de densificação (Figura 2.19e), os corpos de prova foram resfriados sob ventilação forçada, permanecendo sob compressão até atingirem 60°C. Como resultado, a densidade básica média das cavilhas aumentou para valores acima de 1.165 kg/m³, com uma taxa de densificação de aproximadamente 54%.

Figura 2.19 – Processo de fabricação de cavilha densificada de madeira de pinho escocês (*Pinus sylvestris*).



Fonte: Mehra (2020), p. 66.

As cavilhas densificadas tiveram suas propriedades mecânicas comparadas com as de uma cavilha produzida madeira de folhosa sem densificação. Após a caracterização do material, concluiu-se que o processo de densificação aumentou a resistência ao embutimento, à flexão e ao cisalhamento. Por outro lado, o material passou a ter comportamento mais frágil

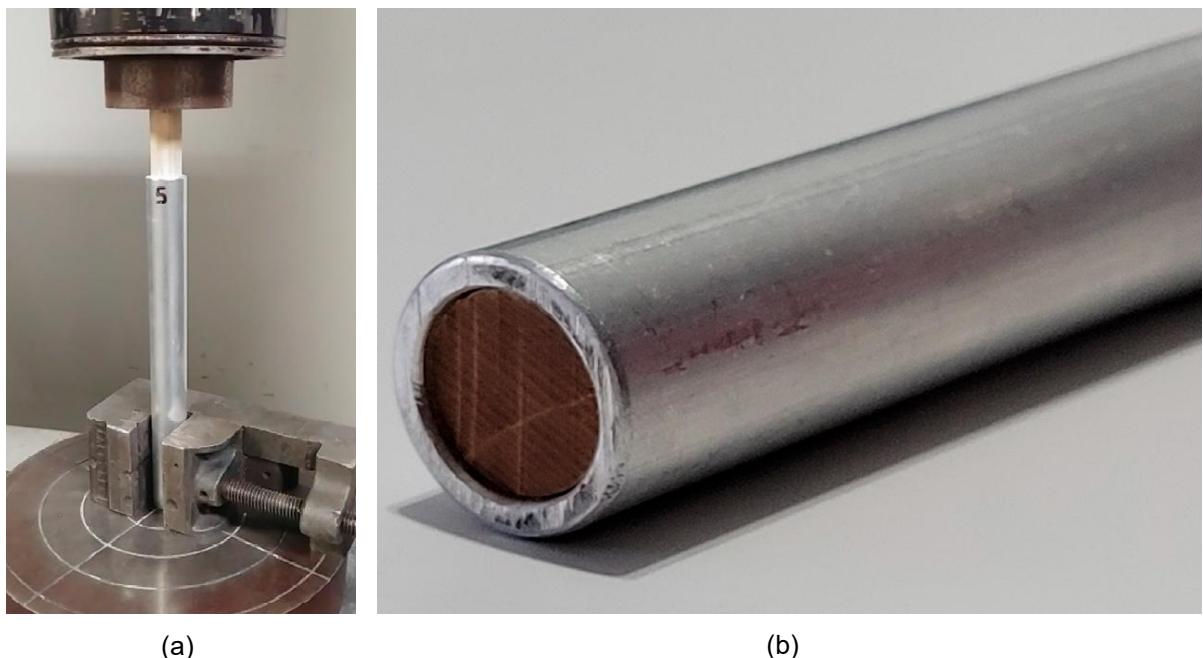
quando comparado com as cavilhas naturais (Mehra, 2020; Namari *et al.*, 2021). Em seguida, as cavilhas foram testadas em conexões engastadas entre viga-pilar (Mehra *et al.*, 2024). Como parte do trabalho do grupo de pesquisa, O’Ceallaigh *et al.* (2021) avaliaram a capacidade dessas cavilhas como material de reforço em placas de CLT nas zonas de solicitação por compressão perpendicular ao plano.

2.2.5.2 Cavilhas reforçadas

Tétreault *et al.* (2023) propuseram o reforço de cavilhas densificadas de espruce (*Picea spp.*) com revestimento de alumínio (Figura 2.20b). O processo de produção se deu pela penetração de cavilhas anidras no tubo de alumínio (Figura 2.20a). A aderência entre os materiais ocorreu pelo atrito da madeira e o tubo de alumínio após o inchamento da madeira em contato com o ambiente.

Após a caracterização mecânica e a avaliação de conectores de madeira–madeira, os autores concluíram que o reforço com alumínio aumentou a resistência mecânica, assim como aumentou a ductilidade da ligação. O reforço com alumínio e o efeito de confinamento da cavilha ofereceu uma redundância para o ganho de resistência do material.

Figura 2.20 – Cavilhas reforçada com tubo alumínio: (a) preenchimento do tubo com madeira densificada; (b) produto finalizado.



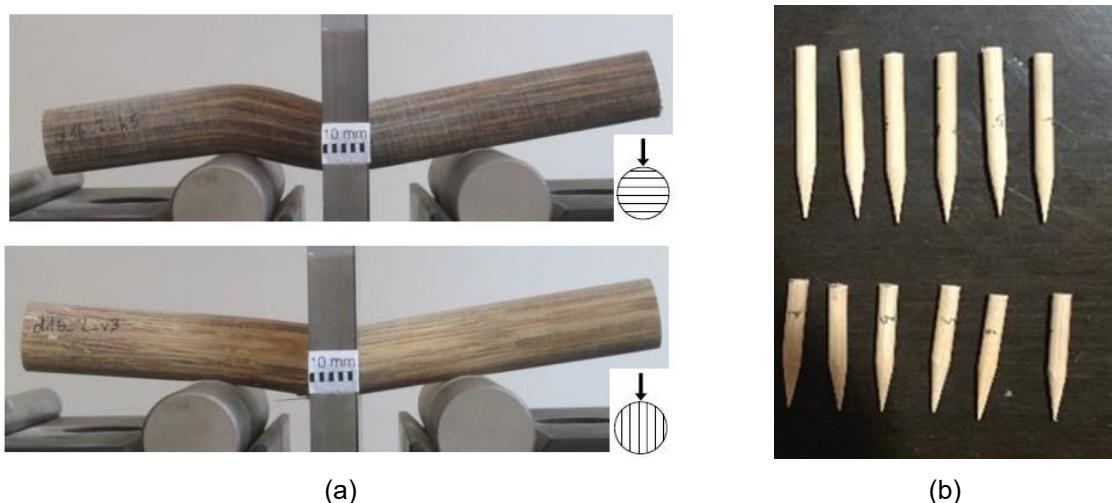
Fonte: Tétreault *et al.* (2023), p. 4

2.2.5.3 Cavilhas de produtos microlaminados

Jockwer *et al.* (2018) e Xu *et al.* (2021) produziram cavilhas a partir de madeira microlaminada colada (ou *laminated veneer lumber* – LVL) de bambu densificado (Figura 2.21). Os trabalhos ratificaram os encontrados por Mehra (2020) e Namari *et al.* (2021) em relação a ganho de resistência mecânica após o processo de densificação da madeira. No entanto, para os produtos à base de bambu, foi identificada uma maior zona de plastificação na solicitação à flexão (Jockwer *et al.* 2018).

Jockwer *et al.* (2018) relataram que, por se tratar de produtos laminados, a ruptura por cisalhamento interlaminar é preponderante dependendo do ângulo de aplicação da força em relação às lâminas. Os autores também relataram uma redução da ductilidade das cavilhas quando a aplicação da força ocorre paralela às lâminas, em comparação da solicitação perpendicular. Em oposição, o momento resistente de plastificação aumentou quando houve aplicação de carga paralela às fibras.

Figura 2.21 – Proposta de cavilha com LVL de bambu densificado: (a) cavilhas de LVL de bambu densificado; (b) pregos de bambu densificados.

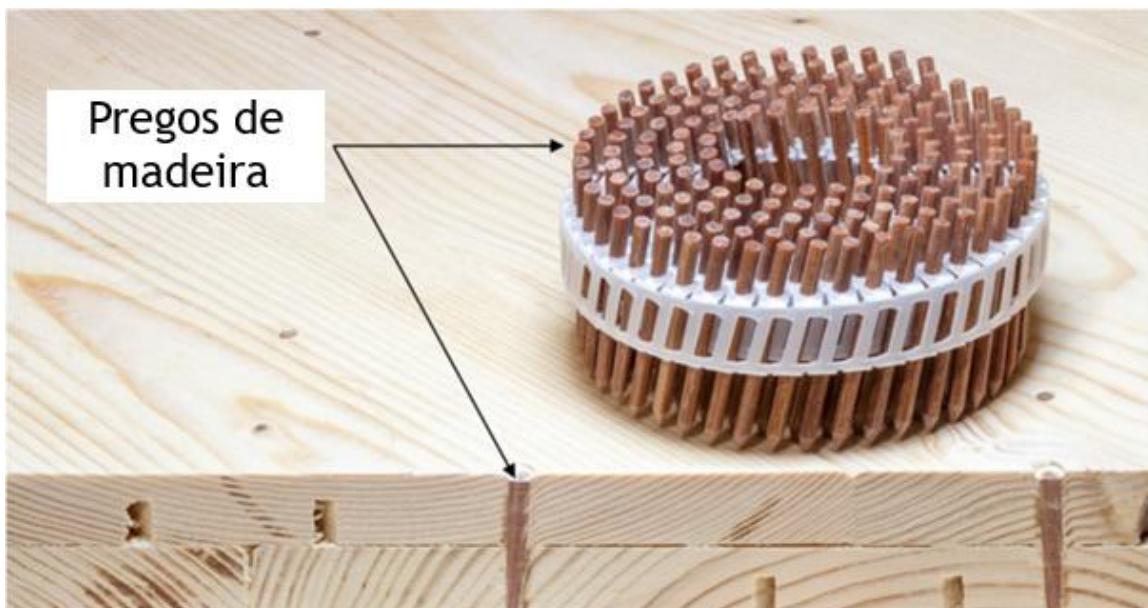


Fonte: (a) Jockwer *et al.* (2018), p. 4; (b) Xu *et al.* (2021), p. 1613.

A empresa LIGNOLOC® desenvolveu uma linha de pregos produzidos a partir de madeira microlaminada densificada de faia europeia (*Fagus sylvatica* L.). A fabricação desses pregos emite 62% menos dióxido de carbono em comparação a pregos metálicos com resistência equivalente (Han *et al.*, 2023). Ruan *et al.* (2022) caracterizaram a rigidez de ligações madeira–madeira utilizando esses elementos de fixação e concluíram que pregos inseridos com inclinação de 30° em relação às fibras da madeira apresentam maior rigidez do que aqueles instalados perpendicularmente. Os autores destacam o potencial de aplicação do produto na fabricação de painéis de madeira lamenada pregada (NLT).

Além disso, o estudo revelou uma lacuna na literatura relacionada aos métodos de inserção desses pregos, observando que, para o trabalho em questão, os ensaios foram limitados à inserção com pré-furação. Novas investigações sobre técnicas alternativas de inserção podem contribuir para o aprimoramento do desempenho mecânico dessas conexões.

Figura 2.22 – Pregos de LVL de faia europeu densificadas, produzidas pela LIGNOLOC®.



Fonte: Han *et al.* (2023), p. 20.

2.2.6. Considerações sobre os conectores cavilhados

A comunidade científica reconhece o potencial dos conectores à base de madeira como uma alternativa sustentável para o setor da construção civil. Além disso, a eficiência mecânica dos conectores do tipo cavilhado tem se mostrado vantajosa em diversas aplicações estruturais. Técnicas de modificação da madeira, como o reforço e a densificação, têm se revelado promissoras para o aumento da resistência desses conectores, oferecendo desempenho comparável ou até superior ao dos conectores metálicos.

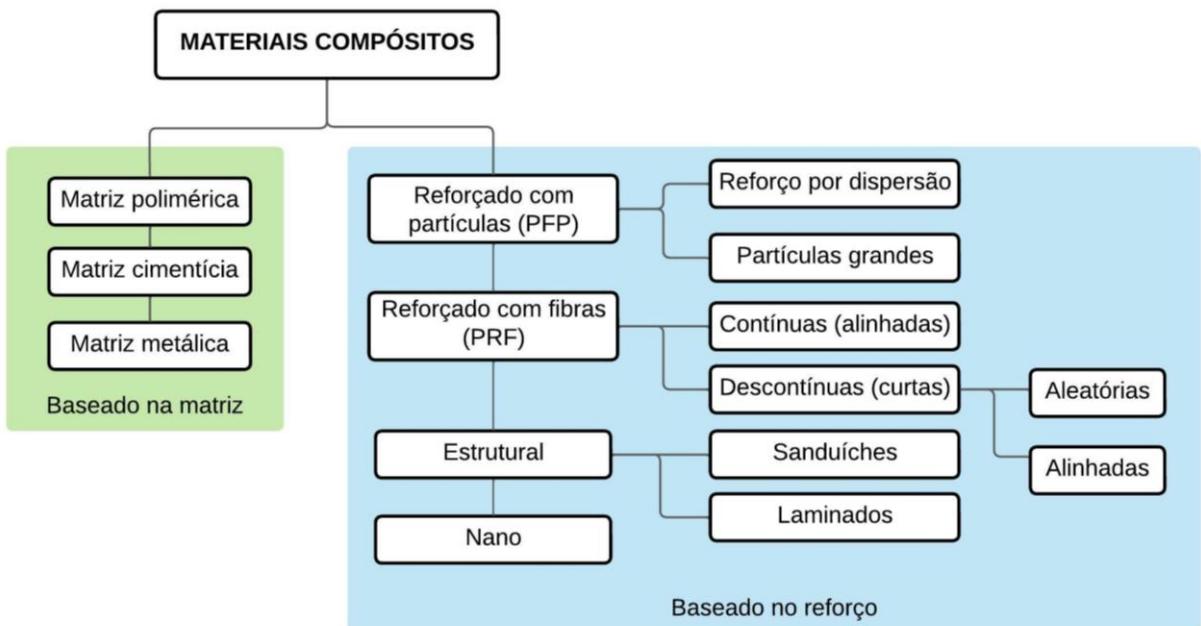
Entretanto, a caracterização mecânica desses elementos ainda constitui um campo em desenvolvimento. A diversidade de métodos utilizados para a obtenção das propriedades dificulta a comparação direta dos resultados disponíveis na literatura. De modo geral, os estudos convergem na caracterização experimental dos materiais e na verificação da compatibilidade dos resultados com modelos analíticos baseados na experimentação de protótipos estruturais.

2.3. MATERIAIS COMPÓSITOS

Ao longo da história, a humanidade tem combinado as propriedades dos materiais com o objetivo de desenvolver produtos mais resistentes e duráveis. Na construção civil, em diversos momentos, os materiais compósitos revolucionaram a forma da sociedade construir suas cidades, como exemplo: o desenvolvimento de reforço de blocos de argila, a utilização de fibras naturais para reforço de paredes feitas com solo de massapê e a criação do concreto de cimento Portland. Apesar da origem milenar, os materiais compósitos se tornaram uma matéria distinta de estudo apenas na metade do século XX (Callister e Rethwisch, 2016).

Os materiais compósitos são definidos como qualquer material multifásico que exibe uma proporção das propriedades de todas as fases constituintes, de modo que a combinação dos materiais resulte em um produto de características únicas em comparação aos dos componentes individuais (Callister e Rethwisch, 2016). De maneira simplificada, os compósitos são formados por duas fases: a fase reforço e a fase matriz. A fase reforço é responsável por promover a melhoria nas propriedades. A fase matriz tem objetivo de unir o reforço, promovendo proteção química e mecânica. Diante da diversidade de possibilidades existentes, a classificação dos materiais compósitos pode ser feita de acordo com a matriz ou o reforço, ilustrado na Figura 2.23.

Figura 2.23 – Classificação dos materiais compósitos



Fonte: Feito pelo autor, com referências de: Callister e Rethwisch (2016), p. 584; Sahu e Gupta (2017), p. 1760.

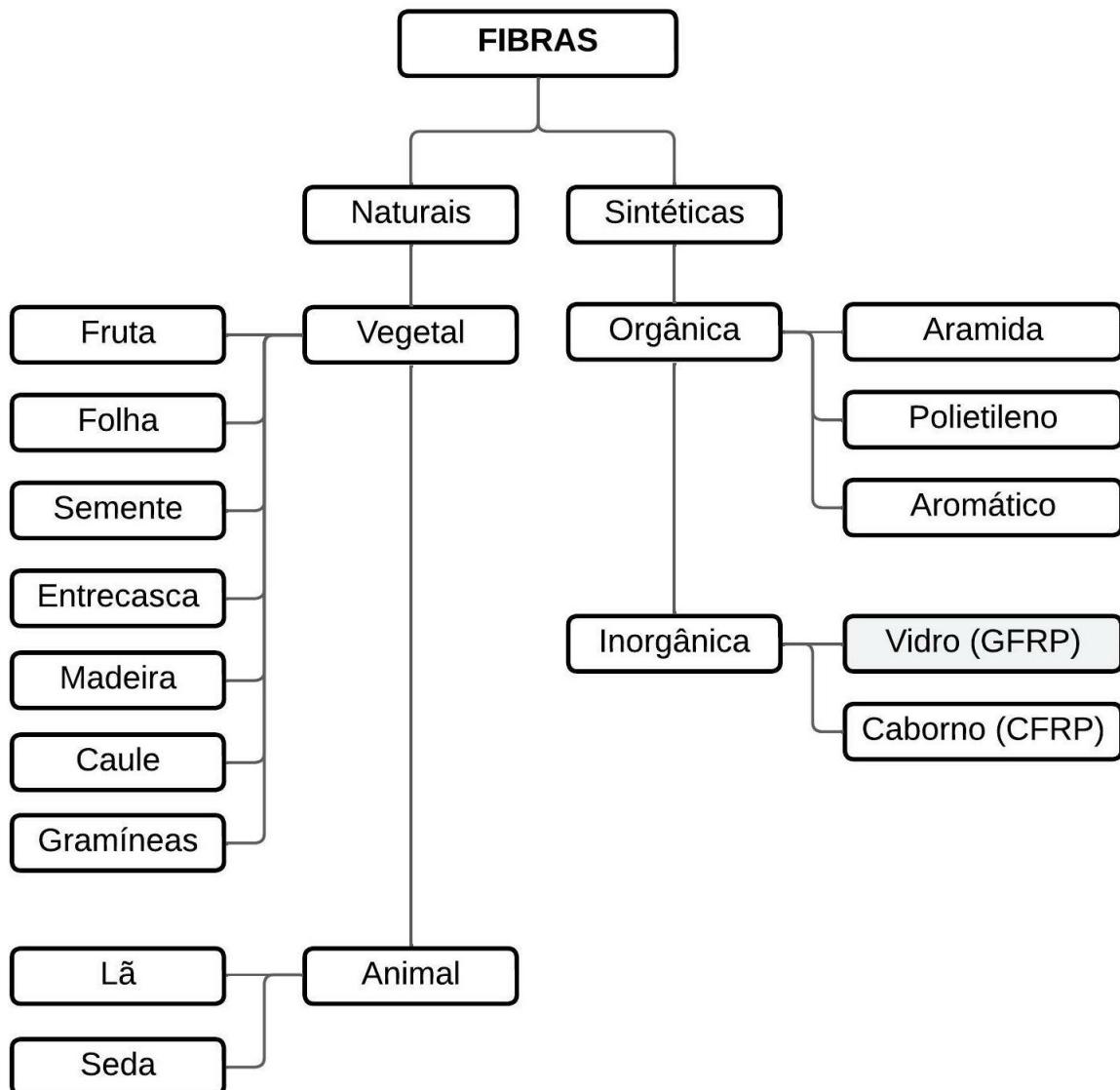
De acordo com a classificação apresentada na Figura 2.23, a cavilha de madeira reforçada com fibras de vidro em matriz epóxi é considerada como material compósito

reforçado com fibras contínuas. Portanto, esta subseção focará na aplicação de compósitos reforçados com fibras (PRF).

2.3.1. Polímeros reforçados com fibras (PRF)

Os materiais compósitos com reforço de fibras costumam conferir aumento nas propriedades mecânicas de tração, na flexão e maior capacidade de absorção de energia. O resumo da classificação das fibras, segundo a sua origem, é ilustrado na Figura 2.24.

Figura 2.24 – Classificação das fibras, segundo sua origem.



Fonte: Sahu e Gupta (2017), p.1761.

As fibras de origem natural têm apresentado boas resistências mecânicas como material de reforço, além de possuir maior apelo sustentável em comparação com as fibras sintéticas, as quais necessitam de um processamento industrial para fabricação. Por outro lado, as fibras

naturais possuem as seguintes desvantagens: não possuem propriedades uniformes, têm maior capacidade hidrofílica, são suscetíveis a variações volumétricas e são incompatíveis com matrizes poliméricas hidrofóbicas. Muitas vezes torna-se necessário o tratamento das fibras naturais de maneira que seja possível contornar tais características. Por isso, no campo da construção civil é frequente o uso de fibras sintéticas à base de fibras de vidro ou de fibras de carbono.

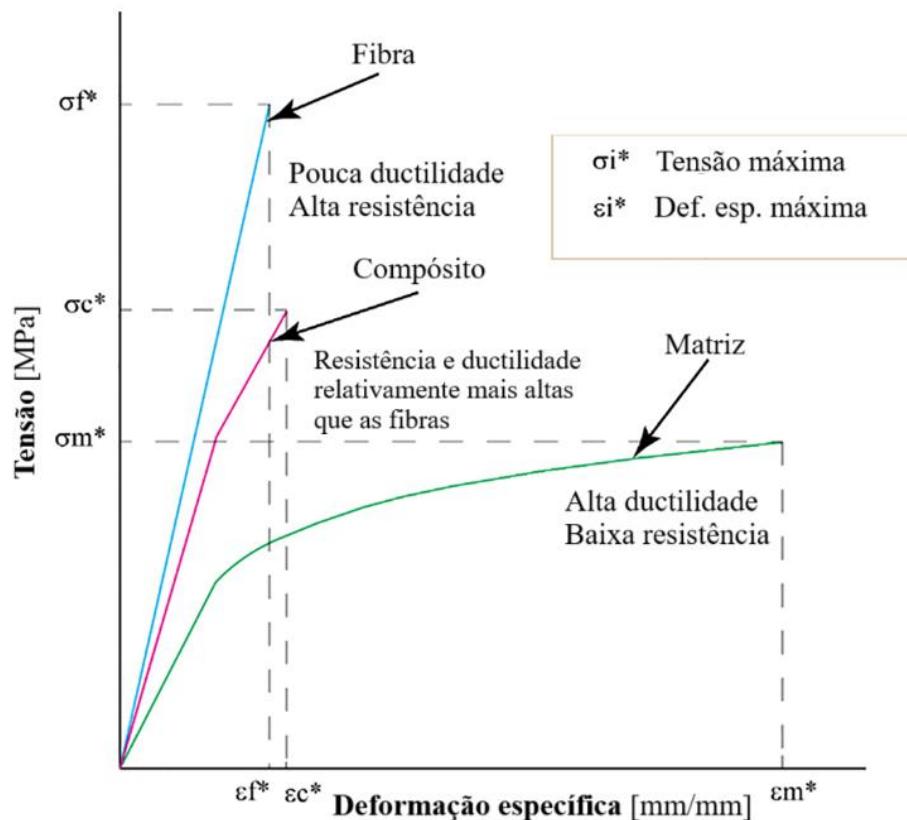
Além da classificação de acordo com a origem da fibra, as propriedades dos polímeros reforçados com fibras podem diferir de acordo com o comprimento, a orientação e a concentração das fibras (Callister e Rethwisch, 2016). Estes autores explicam que o aumento da resistência do compósito depende do comprimento crítico da fibra (l_c), em que $20d < l_c < 150d$ e d é o diâmetro da fibra. Os autores explicam a relação entre o comprimento crítico e o comprimento da fibra (l):

- a) quando $l_c \leq l$: são denominados polímeros de fibras contínuas e capazes de promover aumento das resistências mecânicas;
- b) quando $l_c > l$: são denominados polímeros de fibras curtas, não sendo capazes de promover aumento das resistências mecânicas. Em alguns casos esta condição é de interesse de aplicação, por exemplo, ao adicionar fibras para controle da fissuração de concretos.

Outro aspecto importante é a orientação das fibras na matriz. A orientação das fibras é importante para melhorar a resposta mecânica na direção do reforço. Ainda podem-se ter fibras orientadas em mais de uma direção. É comum que as fibras contínuas sejam comercializadas com fibras orientadas em uma direção (unidirecionais), duas direções (bidirecionais) ou três direções, enquanto as fibras curtas são comercializadas sem orientação. Por fim, a concentração de fibras determina a capacidade máxima de reforço.

Os polímeros reforçados com fibras (PRF) são compósitos formados pela incorporação de fibras contínuas em uma matriz polimérica. As fibras são os principais responsáveis pela resistência mecânica do compósito, enquanto a matriz, embora possua menor resistência, atua como agente de ligação entre as fibras, distribuindo as tensões e conferindo certa ductilidade ao material. Dessa forma, a matriz contribui para reduzir a característica de ruptura frágil inerente das fibras (Che, 2023). A Figura 2.25 ilustra as curvas típicas de tensão–deformação específica para o ensaio de tração da fibra, do compósito e da matriz, ilustrando o comportamento típico dessas fases.

Figura 2.25 - Curva tensão - deformação específica típica do ensaio de tração para: fibras, compósito e matriz.



Fonte: Egbo (2021), p. 561.

A Tabela 2.3 traz as características típicas de alguns materiais utilizados em forma de fibras de reforços em PRF. Os materiais descritos possuem características distintas acerca de sua cristalinidade, sendo alguns policristalinos, e outros amorfos.

Tabela 2.3 – Características típicas de fibras utilizados como reforço.

Material	MOE (GPa)	f_t (GPa)	$\epsilon_{t,max}$ (%)	α_L ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	ρ (g/cm³)
Vidro-E	70–80	2,0–4,8	3,5–4,5	5,0–5,4	2,5–2,6
Carbono	240–760	2,4–5,1	0,5–1,7	(−1,4) – (−0,6)	1,8–1,9
Aramida	62–180	3,6–3,8	1,9–5,5	−2,0	1,4–1,7
Basalto	82–110	0,8–3,4	5,5	3,1	1,5–2,7
Boro	400	3,6	—	—	2,5
SiC	400	3,9	—	—	3,0

Legenda: SiC = Carbeto de Silício. MOE = Módulo de Elasticidade. f_t = resistência à tração. $\epsilon_{t,max}$ = deformação específica máxima na tração. α_L = coeficiente de dilatação térmica longitudinal. ρ = densidade.

Fonte: Callister e Rethwisch (2016), p.598 e Schober et al. (2015), p.107.

2.3.2. Polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP)

Os polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) são frequentemente mais utilizados no reforço de peças de madeira, devido a sua boa resistência mecânica e custo relativamente mais baixo que outras fibras sintéticas, a exemplo das fibras de carbono (Schober *et al.*, 2015). Atualmente, as fibras de vidro são comumente comercializadas na forma de tecidos, mantas e barras.

As fibras de vidro possuem classificação distinta em relação a sua propriedade física principal. No Quadro 2.5 relacionam-se a classificação das fibras de vidro e sua propriedade física correspondente. A Tabela 2.4 e a Tabela 2.5 trazem, respectivamente, a composição química das fibras de vidro e algumas propriedades físicas e mecânicas.

Quadro 2.5 – Classificação das fibras de vidro e sua propriedade física principal.

Classificação	Propriedade física principal
Vidro-A	Altura durabilidade, resistência mecânica e resistividade elétrica.
Vidro-C	Alta resistência à corrosão.
Vidro-D	Baixa constante dielétrica.
Vidro-E	Alta resistência mecânica e resistividade elétrica.
Vidro-AR	Alta resistência à ambientes alcalinos.
Vidro-R	Alta resistência mecânica e resistência à corrosão ácida.
Vidro-S	Alta resistência à tração.
Vidro-S2	Alta resistência mecânica, módulo de elasticidade e estabilidade.

Fonte: Sathishkumar, Satheeshkumar e Naveen (2014)

Tabela 2.4 – Composição química das fibras de vidro, em % em relação ao peso.

Tipo	SiO₂	Al₂O₃	TiO₂	B₂O₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	ZrO₂
Vidro-E	55,0	14,0	0,2	7,0	22,0	1,0	0,5	0,3	-
Vidro-C	64,6	4,1	-	5,0	13,4	3,3	9,6	0,5	-
Vidro-S	65,0	25,0	-	-	-	10,0	-	-	-
Vidro-A	67,5	3,5	-	1,5	6,5	4,5	13,5	3,0	-
Vidro-D	74,0	-	-	22,5	-	-	1,5	2,0	-
Vidro-R	60,0	24,0	1,0	-	9,0	6,0	0,5	0,1	-
Vidro-AR	65,2	-	5,5	-	3,4	-	10,8	2,1	13,1

Fonte: Sathishkumar, Satheeshkumar e Naveen (2014); Scheffler *et al.* (2009)

Tabela 2.5 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras de vidro.

Tipo	ρ (g/cm³)	f_t (GPa)	E (GPa)	ε_{max} (%)	α_L ($10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)
Vidro-E	2,58	3,445	72,3	4,8	54
Vidro-C	2,52	3,310	68,9	4,8	63
Vidro-S2	2,46	4,890	86,9	5,7	16
Vidro-A	2,44	3,310	68,9	4,8	73
Vidro-D	2,11	2,415	51,7	4,6	25
Vidro-R	2,54	4,135	85,5	4,8	33
Vidro-AR	2,70	3,241	73,1	4,4	65

Legenda: ρ = densidade; f_t = resistência máxima a tração; E = Módulo de Elasticidade; α_L = coeficiente de dilatação térmica longitudinal. ε_{max} = deformação específica máxima de alongamento.

Fonte: Sathishkumar, Satheeshkumar e Naveen (2014)

Em relação às propriedades mecânicas, todos os tipos de fibra de vidro possuem valores de resistência e rigidez superiores aos do concreto e da madeira, especialmente no que se refere ao módulo de elasticidade. Portanto, quando aplicada em maiores quantidades, as fibras de vidro desempenham um papel relevante do reforço desses materiais até um limite de adição o qual o reforço não conduz maiores valores de resistência. Por outro lado, a escolha do tipo da fibra tem influência na durabilidade das estruturas, sendo um fator importante a se considerar.

Em ambientes alcalinos, como o concreto, o óxido de silício (SiO_2), principal componente das fibras de vidro, se torna instável, dissolve e reage com hidroxilos livres (OH^-) do concreto, formando hidróxido de silício (SiOH) em gel (Cousin *et al.*, 2019). Esse processo de decomposição é lento e é desacelerado no tempo, pois as partículas de SiOH formam uma camada protetora na fibra. Fibras de vidro do tipo AR possuem maior concentração de SiO_2 , formando uma “camada de sacrifício” na fibra composta por SiOH (Scheffler *et al.*, 2009).

Em ambientes ácidos, como a madeira tratada, há a degradação dos óxidos metálicos presentes na composição da fibra (TiO_2 , Al_2O_3 , CaO), levando ao aparecimento de vazios na microestrutura (Cousin *et al.*, 2019). Apesar de ser um processo de degradação acelerada, a bibliografia não aponta redução significativa nos valores das resistências das fibras, porém, é identificado um comportamento mais frágil na rigidez de fibras degradadas por acidificação (Sathishkumar, Satheeshkumar e Naveen, 2014).

2.3.3. Madeira reforçada com fibras de vidro (GFRP)

O reforço de materiais com fibras de vidro é uma prática difundida na engenharia, especialmente nas áreas relacionadas à reabilitação de estruturas. A falta de conhecimento e normatização sobre a prática atrasa a aplicação de fibras de vidro em elementos de madeira (Schober *et al.*, 2015). Nos últimos anos, o Brasil desenvolveu algumas pesquisas sobre o tema, as quais estão resumidas no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 – Resumo de trabalhos sobre madeiras reforçadas com GFRP no Brasil.

Referência	Descrição e principais conclusões
Fiorelli (2005)	O autor avaliou experimentalmente vigas de madeira lamelada colada (MLC) reforçadas com GFRP. O reforço aumentou o momento fletor resistente das vigas. Adicionalmente, o autor validou o método da seção transformada para o dimensionamento das vigas reforçadas.
Miotto (2009)	O autor estudou estruturas mistas de concreto e MLC reforçada com GFRP. O autor detectou um aumento de 22% na resistência das vigas reforçadas. O método γ foi validado para o dimensionamento desses elementos.
Icimoto (2018)	Desenvolveu dormentes ferroviários de MLC reforçados com GFRP e avaliou suas propriedades mecânicas. Diversas considerações foram feitas em relação ao reforço das fibras para colaborar com a durabilidade e aumentar a resistência a cargas dinâmicas.
Valle <i>et al.</i> (2019)	Avaliaram a influência da temperatura na aderência entre tecidos de GFRP e a madeira. Os autores mostraram que o adesivo epóxi é sensível à variação de temperatura e indicaram o uso de coeficiente de segurança para estruturas sob temperaturas superiores a 60°C.

Fonte: Autor.

As publicações consultadas mostram que a maioria dos estudos de reforço de madeira com fibras de vidro está focado na melhoria de elementos estruturais (exemplo: vigas e dormentes ferroviários), tendo como resultado um aumento nas propriedades mecânicas, principalmente na solicitação à tração e flexão. Em comum, as referências convergem acerca da forma das fibras de vidro (tecido) e a maneira de aplicação (manual ou *hand lay-up*). Os trabalhos também consideraram o reforço de GFRP como uma lâmina de tecido aplicado na estrutura ao longo de uma dimensão, usualmente, o comprimento.

Otoom *et al.* (2022) estudaram o reforço de pilares circulares de madeira em flexo-compressão com o invólucro de GFRP em matriz epóxi. Os autores concluíram que a matriz epóxi foi eficiente na transferência de tensões, assim como o tecido de GFRP reduziu as deformações por tração. Rankumar *et al.* (2024) avaliaram diversos produtos de madeira reforçados com tecido de fibras de vidro. A pesquisa concluiu que a rigidez aumentou para

todos os produtos, entretanto, os autores alertaram que o reforço conduziu a rupturas menos dúcteis.

2.3.4. *Matrizes de compósitos madeira–GFRP*

Em compósitos de madeira-GFRP, as matrizes normalmente são compostas por resinas termofixas de cinco categorias diferentes: epóxis, poliuretanos, poliésteres, fenólicos e aminoplásticos (Schober *et al.*, 2015). Devido à capacidade de cura a frio e à facilidade de aplicação em condições normais de ambiente, as resinas dos tipos epóxi, poliuretano e fenol-resorcinol-formaldeído (subgrupo das resinas fenólicas) têm ganhado espaço no mercado.

As resinas de base epóxi são adesivos bicomponentes, em que uma parte corresponde ao ligante epóxi, usualmente composto por um pré-polímero de éter diglicidílico de bisfenol A. A outra parte, chamada de endurecedor, é uma substância rica em moléculas de hidrogênio reativas com os anéis de epóxi e capazes de criar cadeias intermoleculares tridimensionais.

A resistência do adesivo depende do tipo e da quantidade de compostos epoxídicos e dos componentes endurecedores. Devido à variedade de materiais com presença de anéis epóxi e de endurecedores, a resistência da cola, o tempo de cura e a viscosidade dos materiais variam consideravelmente (Pizzo e Smedley, 2015).

Assim como as resinas de base epóxi, os adesivos poliuretanos são substâncias bicomponentes compostas por uma base ligante e um endurecedor. No entanto, os endurecedores de adesivos poliuretanos são compostos ricos em hidroxilas (–OH). Devido à umidade da madeira, é comum que as hidroxilas livres na superfície da madeira atuem como endurecedores, diminuindo o tempo de cura dos adesivos (Pizzo e Smedley, 2015).

As resinas compostas por fenol-resorcinol-formaldeído são adesivos bicomponentes assim como os anteriores. A maior limitação desse tipo de resina é o seu tamanho molecular. Por ser um polímero grande, as resinas de fenol-resorcinol-formaldeído têm baixa capacidade de preencher vazios, logo, podem não ser eficientes em madeiras com maior densidade, dependendo de um sistema de aplicação por pressão (Pizzo e Smedley, 2015).

2.3.5. *Comportamento da interface madeira–GFRP*

A capacidade de reforço é determinada principalmente pela ligação entre a fibra de reforço e a madeira, portanto, o comportamento do adesivo presente na interface entre os dois materiais tem sido tema de diversas pesquisas sobre madeira reforçada com fibras. No momento, esse conhecimento em torno do assunto ainda é inicial, mas algumas descobertas recentes podem ser vistas no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 – Pesquisas sobre o comportamento da interface FRP-madeira.

Referência	Descrição e principais descobertas
Raftery, Harte e Rodd (2009)	Testaram a durabilidade da interface entre tecidos de fibras colados na madeira com adesivo de base epóxi. Os resultados mostraram que, em condições de umidade da madeira elevada ($U > 50\%$), as tensões geradas pela dilatação volumétrica da madeira podem reduzir a resistência na linha de cola em até 50%.
Zhou <i>et al.</i> (2015)	A partir de experimento e simulações moleculares avaliaram a influência da umidade na aderência de adesivos epóxi em FRP. Os resultados mostraram que a aderência pode reduzir em até 30% em madeiras com umidade superior ao ponto de saturação das fibras no momento da aplicação do adesivo.
Nadir <i>et al.</i> (2016)	Testaram a aderência de fibras de vidro e de carbono. De acordo com os autores, o tipo de fibra não tem influência na aderência do compósito.
Vahedian, Shrestha e Crews (2017)	Testaram a aderência entre madeira de diversas espécies de folhosas e coníferas e FRP com resina epóxi e poliuretano. Os resultados não mostraram diferenças entre o tipo de resina e a aderência. A aderência não foi comprometida pela densidade da madeira, entretanto, os autores observaram que os modos de ruptura mudam significativamente.

Fonte: Autor.

2.3.6. Considerações sobre os GFRP como reforço de madeira

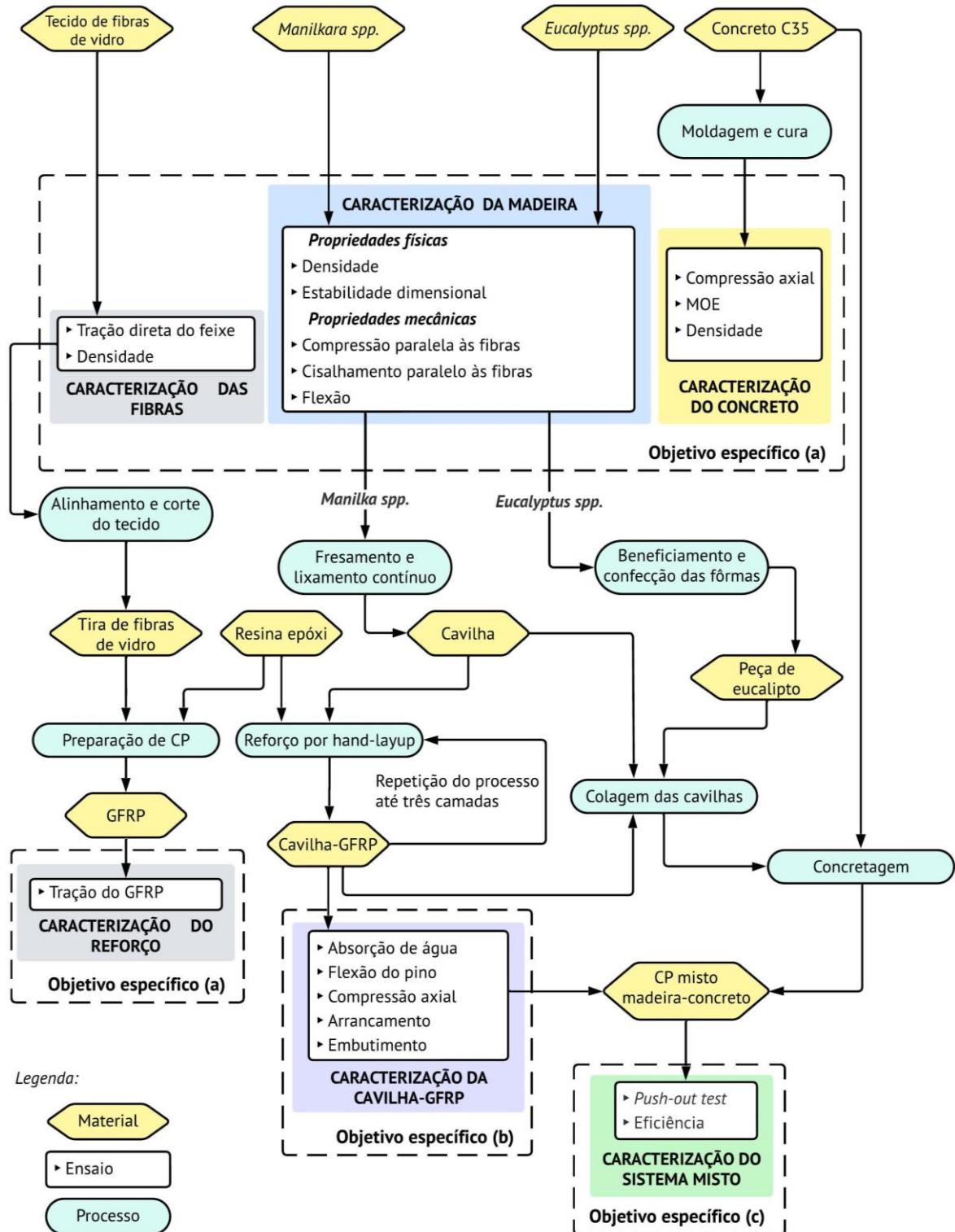
O uso de fibras sintéticas incorporadas em matrizes poliméricas tem sido amplamente empregado na construção civil com o objetivo de modificar as propriedades mecânicas dos materiais, especialmente para aumentar sua resistência à tração e a rigidez. Nesse contexto, as fibras de vidro têm se destacado por apresentarem elevados valores de resistência mecânica, além de baixo custo em comparação com outros materiais, como as fibras de carbono.

O mecanismo de aderência entre a matriz polimérica e a madeira ocorre por meio da penetração do adesivo nos poros da madeira. Assim, adesivos com cadeias poliméricas mais simples apresentam maior capacidade de penetração, inclusive em madeiras de maior densidade. A literatura ainda não apresenta um consenso sobre possíveis limitações no uso de adesivos para a colagem de tecidos de fibras de vidro em diferentes espécies de madeira. No entanto, deduz-se que as matrizes epóxides, embora menos sustentáveis, são mais eficazes na penetração em madeiras densas, promovendo melhor aderência entre o compósito reforçado com fibras (FRP) e a madeira.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os procedimentos metodológicos desta pesquisa. A Figura 3.1 ilustra o fluxograma dos processos e dos ensaios presentes no trabalho.

Figura 3.1 – Fluxograma do programa experimental da pesquisa.



Fonte: Autor.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Madeira de eucalipto

Para a realização deste trabalho foram obtidas trinta e cinco toras roliças de madeira de *Eucalyptus cloeziana* adquiridas junto à empresa Venturoli, localizada no município de Camaçari – BA. A madeira tem origem nas florestas plantadas no município de Araçás – BA (12,2°S; 38,2°W). As peças tinham diâmetro de base variável entre 16 cm e 18 cm e 3 metros de comprimento, totalizando um lote com volume de 2,05 m³ de material.

O beneficiamento e o aplainamento da madeira foram realizados na carpintaria do Laboratório de Madeiras da UFBA (LABMAD/UFBA), o qual conta com equipamentos de plaina, serra de bancada e desengrossadeira. A Figura 3.2 ilustra a estocagem das toras de eucalipto no pátio da empresa. Não foi realizado nenhum tipo de procedimento para secagem, apenas o afastamento das toras do contato com o solo para evitar acúmulo de umidade e crescimento de fungos. Ao chegar no laboratório, as peças foram estocadas em local coberto do sol, onde foram secas em temperatura ambiente por seis meses anteriores à realização dos ensaios de caracterização.

Figura 3.2 – Estocagem da madeira de *Eucalyptus cloeziana* no pátio da empresa.



Fonte: Autor.

3.1.2. Tecido de fibra de vidro (GFRP)

O reforço das cavilhas foi feito com tecido de fibras de vidro fornecido pela empresa Texiglass, com nome comercial WR-200. O tecido é composto por fios lisos com tecelagem

bidirecional (50%/50%), do tipo sarja em desenho 3x1 e a disposição entre a trama e o urdume foi de 0°/90°. As características do material são apresentadas na Tabela 3.1. A Figura 3.3 ilustra o tecido de fibra de vidro. A escolha do tecido com essas características se deu pelo fato do tecido bidirecional manter um cobrimento uniforme ao longo da cavilha.

Tabela 3.1 – Característica do tecido de fibra de vidro.

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Nominal	Máximo
Densidade superficial	g/m ²	180	200	220
Número de fios do urdume	Fios/cm	4,8	5	5,3
Número de fios da trama	Fios/cm	4,5	5	5,5
Espessura do tecido	mm	0,18	0,21	0,24
Carga de ruptura teórica do urdume	kgf/cm	40	50	55
Carga de ruptura teórica da trama	kgf/cm	40	50	55

Fonte: Texiglass (2018).

Figura 3.3 – Tecido de fibras de vidro.



Fonte: Autor.

3.1.3. Resina epóxi

A matriz do reforço utilizada neste trabalho foi a resina epóxi de nome comercial Araldite GY 260 (componente A), comercializada em empresas locais. De acordo com o fabricante, a resina é comercializada para utilização como adesivo e revestimento. Como agente de cura da resina, foi utilizado o endurecedor Aradur 450 (componente B). A relação A:B utilizada neste trabalho foi 2:1. As especificações da resina de base epóxi e do endurecedor se encontram na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Característica da resina Araldite GY 260 e do endurecedor Aradur 450.

Parâmetro	Araldite GY 260	Aradur 450
Característica	Epóxi líquido a base de bisfenol A	Aduto de poliamidoamina formulado
Estado físico	Líquido	Líquido
Viscosidade (25°C)	11.000 ~ 14000 mPas	1000 ~ 2000 mPas
Peso específico	1,20 g/cm ³ (a 20°C)	1,01 g/cm ³ (a 20°C)
Equivalente epóxi	183 ~ 188 g/Eq	–
Teor epóxi	5,32 ~ 5,44 Eq/kg	–
Valor amínico	–	4,45 ~ 5,15 Eq/kg
Índice de amina	–	250 ~ 290 mg KOH/g

Fonte: Huttonsman (2020a, 2020b)

3.1.4. Cavidas-GFRP

As cavilhas foram produzidas com madeira de maçaranduba (*Manilkara spp.*) obtidas a partir de madeireiras certificadas, tendo em vista a disponibilidade dessa madeira na região de Salvador-BA. Foram obtidas quinze peças com seção transversal retangular de 4,5 cm por 15 cm e 1,5 metro de comprimento, totalizando um lote com volume de 0,15 m³. Após a retirada da amostra para caracterização da madeira de maçaranduba, as peças foram levadas para a fabricação das cavilhas na carpintaria do LABMAD/UFBA.

O processo de fabricação das cavilhas envolveu as etapas de serragem, fresamento, torneamento e lixamento contínuo da superfície da madeira até a obtenção de varas com o diâmetro desejado. Em seguida, as varas foram seccionadas em comprimentos de 10 cm, originando as cavilhas de maçaranduba. Ao todo, foram produzidas 160 cavilhas, cujos diâmetros foram medidos com auxílio de um paquímetro em três pontos aleatórios ao longo do comprimento, permitindo o cálculo do diâmetro médio de cada peça. As características geométricas das cavilhas estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados geométricos das cavilhas.

Código	d_{nom} (mm)	$d_{mínimo}$ (mm)	$d_{máximo}$ (mm)	$d_{médio}$ (mm)	Δd (mm)	$C_{médio}$ (mm)
D16	16,00	15,27	15,97	15,85	0,13	100,49
D20	20,00	19,06	19,87	19,53	0,24	100,51

Legenda: d_{nom} = diâmetro nominal. $d_{mínimo}$ = diâmetro mínimo. $d_{máximo}$ = diâmetro máximo. $d_{médio}$ = diâmetro médio. Δd = variação média do diâmetro da cavilha. $C_{médio}$ = comprimento médio.

Fonte: Autor.

Em seguida, foi feito o processo de reforço das cavilhas, seguindo as etapas:

- a) a preparação da superfície do tecido com fita crepe com intenção de manter a posição das fibras conforme produzidas e manter a orientação dos fios no momento de reforçar as cavilhas de madeira (Figura 3.4a);
- b) recorte do tecido nas dimensões necessárias para o reforço das cavilhas (Figura 3.4b);
- c) dosagem dos componentes A e B na proporção 2:1 (A:B) dos componentes da resina epóxi (Tabela 3.2) (Figura 3.4c);
- d) mistura manual dos componentes por 3 minutos em condições do ambiente do laboratório (aprox. 25°C e 75% UR) (Figura 3.4d);
- e) aplicação da resina no tecido e na cavilha com pincel. A gramatura média da resina epóxi foi de 44,7 g/m² (Figura 3.4e e Figura 3.4f);
- f) envolvimento da cavilha com o tecido (Figura 3.4g e Figura 3.4h);
- g) retirada do excesso do adesivo e cura por 24 horas em temperatura ambiente (Figura 3.4i);
- h) retirada da fita crepe de proteção do tecido e o produto finalizado (Figura 3.4j).

Após o processo de fabricação das cavilhas reforçadas com fibras de vidro, as cavilhas permaneceram estocadas por, pelo menos, 30 dias. O processo teve como objetivo de garantir a completa cura da resina epóxi.

Figura 3.4 – Processo de aplicação do reforço de fibras de vidro na cavilha de maçaranduba (continua).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.4 – Processo de aplicação do reforço de fibras de vidro na cavilha de macaranduba (continuação).



(g)



(h)



(i)



(j)

Fonte: Autor.

O tempo de manuseio da resina foi de 30 minutos por mistura. Devido à limitação do tempo, o reforço era realizado em lotes com cerca de 15 cavilhas. Para considerar a variação nas propriedades de acordo com a quantidade de reforço, três densidades de reforços foram propostas: com uma camada de tecido, com duas camadas de tecido e com três camadas de tecido. Para cada camada adicional, o processo ilustrado na Figura 3.4 se repetia. A Tabela 3.4 mostra as informações básicas do compósito cavilha–GFRP.

Tabela 3.4 – Dados do compósito cavilha–GFRP

Código	$d_{médio}$ (mm)	% reforço em relação ao diâmetro	% reforço em relação a massa
D16-1R	16,98	7,12	5,56
D16-2R	18,13	14,38	12,47
D16-3R	19,34	22,01	19,00
D20-1R	21,19	7,12	8,85
D20-2R	22,88	15,67	17,46
D20-3R	24,29	22,80	22,10

Legenda: DXX-YY, onde XX representa o diâmetro nominal da cavilha e YY representa a quantidade de reforço, sendo: 1R para uma camada de reforço, 2R para duas camadas de reforço e 3R para três camadas de reforço.

Fonte: Autor.

3.1.5. Concreto

O concreto utilizado neste trabalho para a confecção dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento dos conectores (*push-out test*) foi fornecido pela empresa de usinagem de concreto Supermix, localizada no município de Salvador. O concreto foi fornecido como classe C35, de acordo com a classificação de resistência da NBR 6118 (ABNT, 2023). O traço do concreto está presente na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Traço do concreto utilizado para os corpos de prova do ensaio de *push-out*.

Material	Cimento CPII-F-40	Areia natural	Areia artificial	Brita 0	Sílica ativa	Água
Proporção	1	1,91	0,82	2,69	0,03	0,53

Fonte: Autor.

Cabe ressaltar que o concreto com brita 0, o qual possui granulometria variando de 4,8 mm a 9,5 mm, resulta em um concreto com maior fluidez. Esta propriedade foi conveniente para a moldagem dos corpos de prova, tendo em vista que o adensamento do concreto foi dificultado pelo limitado espaço interno. Outros autores seguem a mesma recomendação de uso da brita 0 (Miotto, 2009; Fernandes, 2022).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS

A etapa de caracterização da madeira de eucalipto e de maçaranduba se deu por meio da determinação das propriedades físicas e mecânicas. As características físicas foram

determinadas de acordo com os ensaios de densidade aparente (D) e estabilidade dimensional (ED). A caracterização mecânica da madeira foi feita a partir dos ensaios de resistência: à compressão paralela às fibras (COMP-0), à flexão estática em quatro pontos (FL) e ao cisalhamento paralelo às fibras (CIS).

Todos os ensaios foram realizados em máquina universal eletro hidráulica modelo WPN, com capacidade máxima de 300 kN. Os deslocamentos foram medidos com relógio comparador modelo Digimess com faixa de medição 0–25 mm e precisão de 0,01 mm. O Quadro 3.1 apresenta um resumo dos ensaios realizados para a caracterização das madeiras, as propriedades encontradas, a amostragem (N) para a madeira de eucalipto (E) e de maçaranduba (M) e os métodos utilizados.

Quadro 3.1 – Ensaios de caracterização mecânica da madeira utilizada na pesquisa.

Ensaios	Mad.	N	Propriedades estudadas	Método utilizado
D	E	30	Densidade aparente (ρ_{ap})	NBR 7190-3 (ABNT, 2022)
	M	30		
ED	E	30	Deformações específicas de retração (ε_r)	NBR 7190-3 (ABNT, 2022)
	M	30		
COMP-0	E	15	Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}); Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}).	NBR 7190-3 (ABNT, 2022)
	M	12		
FL	E	15	Resistência à flexão (f_M); Módulo de elasticidade na flexão (E_M).	NBR 7190-4 (ABNT, 2022)
	M	6		
CIS	E	12	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}).	NBR 7190-4 (ABNT, 2022)
	M	12		

Fonte: Autor.

Após os ensaios de caracterização mecânica, as amostras (N) dos ensaios de compressão e cisalhamento tiveram a umidade determinada de acordo com o método da NBR 7190-3 (ABNT, 2022), com os corpos de prova inteiramente colocados em estufa modelo SL-100. Para os corpos de prova de flexão, foi seccionado um trecho de 20 cm do centro do vão da amostra e colocado em estufa.

Após determinar a umidade dos corpos de prova (U), as propriedades de resistência e rigidez encontradas foram corrigidas para a condição padrão de referência umidade de equilíbrio da madeira de 12%, de acordo com as Equações (3.1) e (3.2).

$$f_{12} = f_U \left[1 + \frac{3(U - 12)}{100} \right] \quad (3.1)$$

$$E_{12} = E_U \left[1 + \frac{2(U - 12)}{100} \right] \quad (3.2)$$

Os valores característicos de resistência foram determinados pelo modelo de distribuição de probabilidades de Weibull. Os dados de resistência foram ordenados de maneira crescente, de forma que o percentil (p_i) seja dado pela Equação (3.3).

$$p_i = \frac{(i - 0,5)}{N} \quad (3.3)$$

em que i é o elemento i-ésimo da amostra;
 N é o número da amostra.

O coeficiente de variação da cauda (CV_{tail}) é relacionado com a inclinação (s) da reta gerada pela função $\ln(p_i)$ por $\ln[-\ln(1 - p_i)]$ pela Equação (3.4).

$$CV_{tail} = s^{-0,92} \quad (3.4)$$

Os valores característicos da resistência (f_{wk}) foram determinados pelo limite inferior do 5-percentil ($f_{data,0,05,inf}$) dado pela Equação (3.5).

$$f_{wk} = f_{data,0,05,inf} = \left(1 - \frac{2,7CV_{tail}}{\sqrt{N}} \right) f_{data,0,05} \quad (3.5)$$

em que $f_{data,0,05}$ é o valor do 5-percentil, obtido por interpolação linear entre os valores de p-percentil.

Para os valores de rigidez (E_{c0} e E_0), os valores característicos foram determinados de acordo com a rigidez correspondente ao 5-percentil da distribuição de Weibull.

3.2.1. Ensaio de densidade e estabilidade dimensional

O ensaio de densidade e de estabilidade dimensional foi feito com trinta corpos de prova para cada espécie de madeira avaliada na pesquisa (eucalipto e maçaranduba). O ensaio foi realizado em estufa SL-100, utilizando-se balança de precisão 0,01g e paquímetro de precisão

0,01mm. A densidade (ρ) e as deformações específicas de retração ($\varepsilon_{1,2,3}$) foram calculadas de acordo com as Equações (3.6) e (3.7). A densidade foi corrigida para a condição padrão a 12% de acordo com o gráfico de Kollmann, dado pela Equação (3.8).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.6)$$

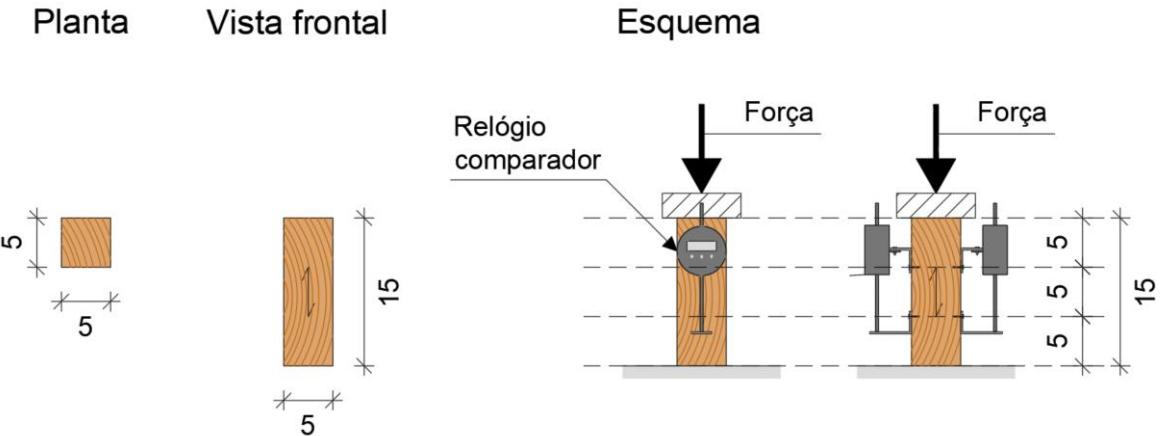
$$\varepsilon_{1,2,3} = \frac{L_{1,2,3,sat} - L_{1,2,3,seco}}{L_{1,2,3,sat}} \quad (3.7)$$

$$\rho_{12} = \rho_U \left[1 + \frac{0,5(12 - U)}{100} \right] \quad (3.8)$$

3.2.2. Ensaio de compressão paralela às fibras

Para a realização deste ensaio, foi utilizado o procedimento previsto na norma brasileira NBR 7190-3 (ABNT, 2022). A deformação no sentido longitudinal foi o resultado da média dos valores medidos com os relógios comparadores acoplados em duas faces opostas do corpo de prova. O ensaio foi feito em máquina universal eletrohidráulica analógica WPM com capacidade de carga de 300 kN, presente no Centro Tecnológico da Argamassa (CETA/UFBA). As dimensões do corpo de prova e o esquema de ensaio são ilustrados na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Dimensões do corpo de prova e esquema de ensaio de compressão paralela às fibras.



Fonte: Autor.

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), em MPa, é determinada pela Equação (3.9).

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (3.9)$$

em que $F_{c0,max}$ é a força máxima aplicada pela máquina;
 A é a área comprimida do corpo de prova.

O módulo de elasticidade (E_{c0}) na direção paralela às fibras é obtido pela inclinação da reta elástica no ensaio de compressão paralela às fibras e determinado pela Equação (3.10).

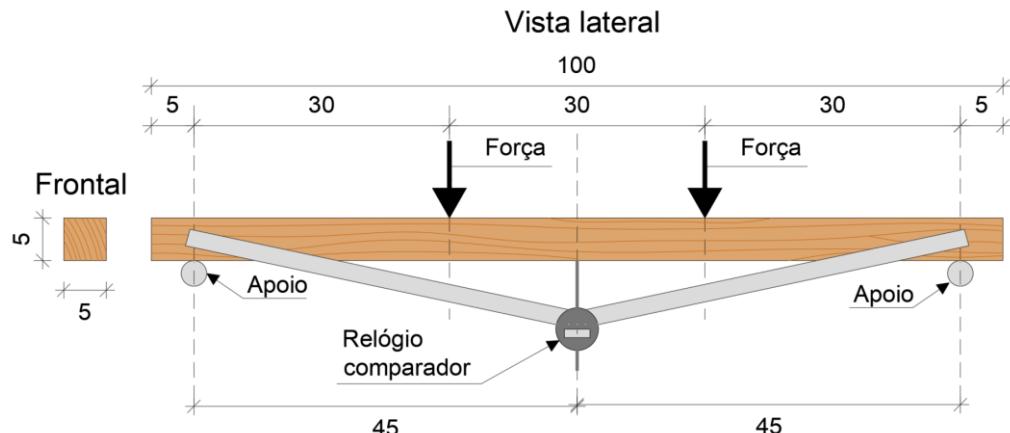
$$E_{c0} = \frac{\sigma_{40\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{40\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.10)$$

em que $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$ são as tensões em 40% e 10% da força de ruptura;
 $\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ são as deformações longitudinais específicas do corpo de prova em 40% e 10% da força de ruptura.

3.2.3. Ensaio de flexão de quatro pontos

Para caracterizar as madeiras quanto à sua resistência (f_M) e rigidez (E_M) à flexão, foi utilizado o procedimento da norma NBR 7190-4 (ABNT, 2022). A flecha (δ) do corpo de prova foi medida com relógio comparador localizado no centro do vão ($L/2$), sendo L o vão útil do corpo de prova. As dimensões do corpo de prova utilizado e o esquema do ensaio são ilustrados na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Dimensões do corpo de prova e esquema de ensaio de flexão em quatro pontos.



Fonte: Autor.

A resistência da madeira à flexão (f_M) é determinada pela Equação (3.11).

$$f_M = \frac{F_{rup}L}{bh^2} \quad (3.11)$$

em que F_{rup} é a força máxima aplicada ao corpo de prova;

b e h as dimensões de base e altura da seção do corpo de prova.

O módulo de elasticidade (E_0), encontrado a partir da reta secante na zona elástica, é determinado pela Equação (3.12).

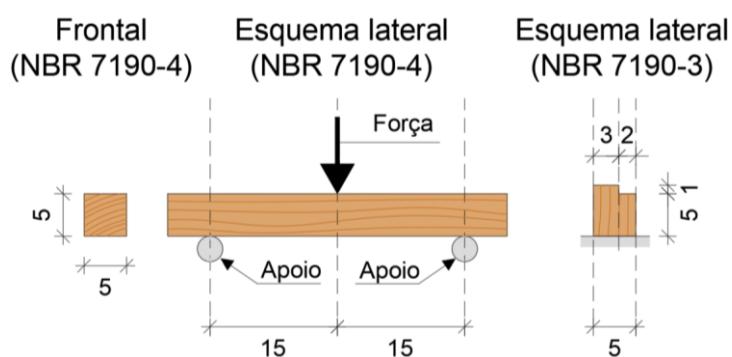
$$E_0 = \frac{23}{108} \left(\frac{L}{h} \right)^3 \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta} \right) \frac{1}{b} \quad (3.12)$$

em que ΔF e $\Delta \delta$ é a variação da força (F) e da flecha (δ) nos instantes entre 10% e 40% da força máxima.

3.2.4. Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

A resistência de cisalhamento da madeira é determinada pela tensão máxima de ruptura no cisalhamento do plano de um corpo de prova de madeira. Para a determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças de eucalipto, foi utilizado o procedimento previsto no item 8.5 da norma brasileira NBR 7190-4 (ABNT, 2022), que determina o método para obtenção da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras a partir do ensaio de flexão em três pontos. Para as peças de maçaranduba, preferiu-se o método presente na NBR 7190-3 (ABNT, 2022), por ser conveniente em peças isentas de defeitos. As dimensões do corpo de prova e o esquema do ensaio é ilustrado na Figura 3.7. A resistência é calculada pela Equação (3.13).

Figura 3.7 – Dimensões do corpo de prova e esquema de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: Autor.

$$f_{v0} = \begin{cases} \frac{0,75F_{v0}}{bh} & (\text{NBR } 7190 - 4) \\ \frac{F_{rupt}}{A_{v0}} & (\text{NBR } 7190 - 3) \end{cases} \quad (3.13)$$

em que F_{rupt} a força máxima aplicada pela prensa.
 A_{v0} é a área de cisalhamento

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

A caracterização do concreto foi realizada por meio do ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm × 20 cm. Foram moldados seis corpos de prova na usina de concreto, conforme as especificações da norma NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 48 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos ao processo de cura em tanque com água saturada com hidróxido de cálcio, pelo período de 25 dias. Concluída a cura, os corpos de prova foram mantidos em ambiente externo para secagem ao ar livre, até o momento da realização dos ensaios de caracterização do concreto em estado endurecido. A Figura 3.8 ilustra o processo de moldagem, cura e caracterização do concreto.

Figura 3.8 – Preparação dos corpos de prova de concreto: (a) moldagem; (b) adensamento; (c) cura e (d) ensaio de compressão axial com módulo de elasticidade.

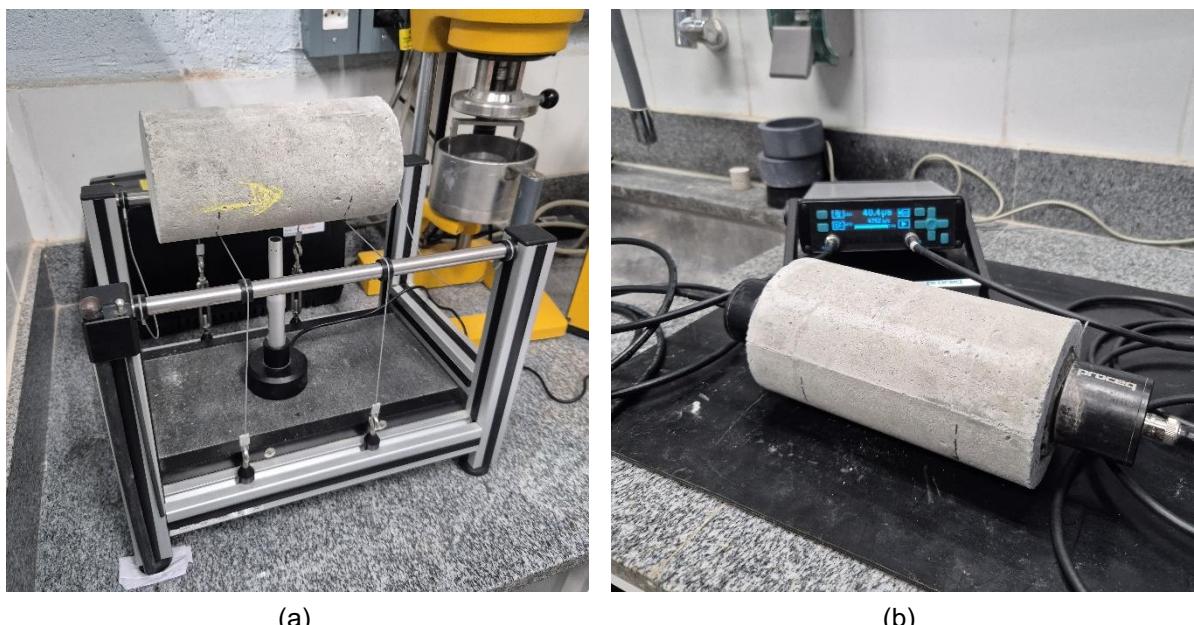


Fonte: Autor.

O concreto foi caracterizado com foco em suas propriedades no estado endurecido, incluindo a resistência à compressão, o módulo estático de elasticidade e o módulo dinâmico de elasticidade. Este último foi obtido por meio de ensaios não destrutivos, utilizando o método das frequências naturais de vibração e a medição da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Inicialmente, os seis corpos de prova foram submetidos aos ensaios não destrutivos. O módulo de elasticidade por vibrações naturais foi determinado conforme a NBR 8522-2 (ABNT, 2021), utilizando o kit de equipamentos Sonelastic® (Figura 3.9a). A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi medida com base na NBR 8802 (ABNT, 2019), utilizando o equipamento Proceq® Pundit Lab (Figura 3.9b).

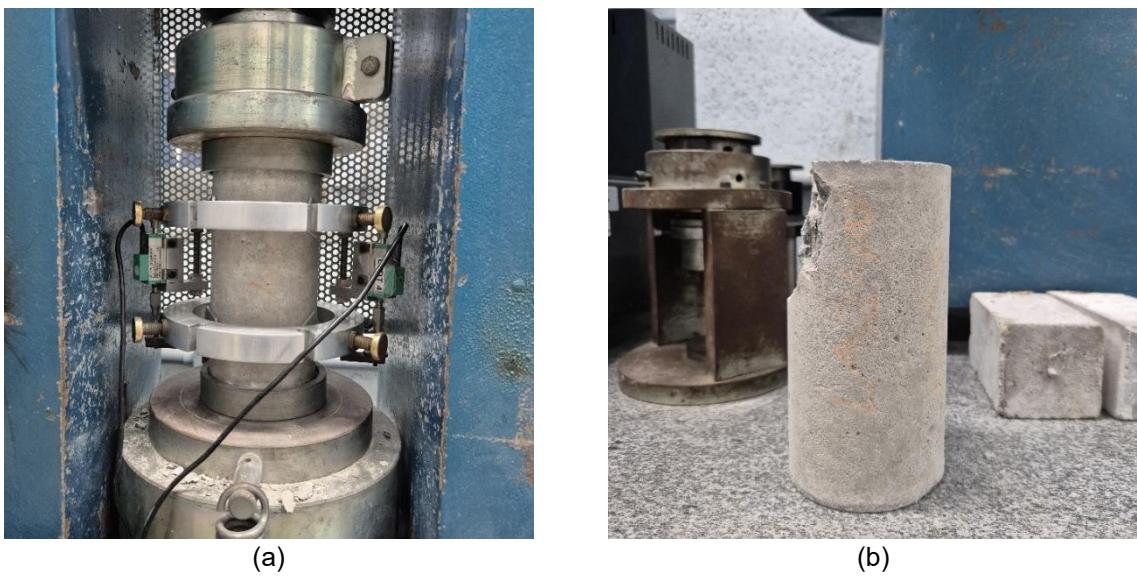
Figura 3.9 – Caracterização do concreto no estado endurecido: módulo de elasticidade pelo (a) método das frequências naturais de vibração e (b) velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.



Fonte: Autor.

Na sequência, foram realizados os ensaios destrutivos. A resistência à compressão foi determinada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), e o módulo estático de elasticidade foi obtido conforme os procedimentos da NBR 8522-1 (ABNT, 2021) (Figura 3.10). Esses ensaios foram conduzidos em prensa eletro-hidráulica Contenco, com capacidade de carga de 200 toneladas, equipada com dois medidores de deslocamento do tipo LVDTs acoplados ao compressômetro instalado nos corpos de prova.

Figura 3.10 – Caracterização do concreto no estado endurecido: módulo de elasticidade pelo (a) módulo estático à compressão e (b) corpo de prova com ruptura típica de topo.



Fonte: Autor.

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d), determinado pelo método da velocidade de propagação de ondas, foi calculado conforme a Equação (3.14). A estimativa do módulo de elasticidade inicial do concreto (E_{ci}) foi obtida com base no modelo proposto por Popovics *et al.* (2008), apresentado na Equação (3.15). Já o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) foi calculado em função da resistência característica do concreto, conforme descrito nas Equações (3.16) e (3.17).

$$E_d = \frac{(1 + \nu^2)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} * V^2 * \rho \quad (3.14)$$

Em que ν é o coeficiente de Poisson, sendo que para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ e tensões de tração menores que f_{ct} , o coeficiente pode ser tomado como igual a 0,2 (ABNT, 2014).

V é a velocidade de propagação da onda, dada por $V = L/t$, onde L é o comprimento do corpo de prova, igual à 20 cm, e t o tempo de propagação, em km/s.

ρ é a massa específica do concreto, tomado pelo $\rho = m/V$, sendo m a massa do corpo de prova e V o volume, em g/cm³.

$$E_{ci} = k * E_d^{1,4} * \rho^{-1} \quad (3.15)$$

sendo k Constante de consideração das unidades de medidas, $k = 0,4275$ quando os valores de E_{ci} e E_d estiverem em GPa e ρ em g/cm³.

$$E_{cs} = \alpha_i * E_{ci} \quad (3.16)$$

$$\alpha_i = 0,8 + \frac{0,2}{80} f_{ck} \leq 1 \quad (3.17)$$

Em que f_{ck} é a resistência característica do concreto, dada por

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645\delta, \text{ onde } \delta = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)^2}.$$

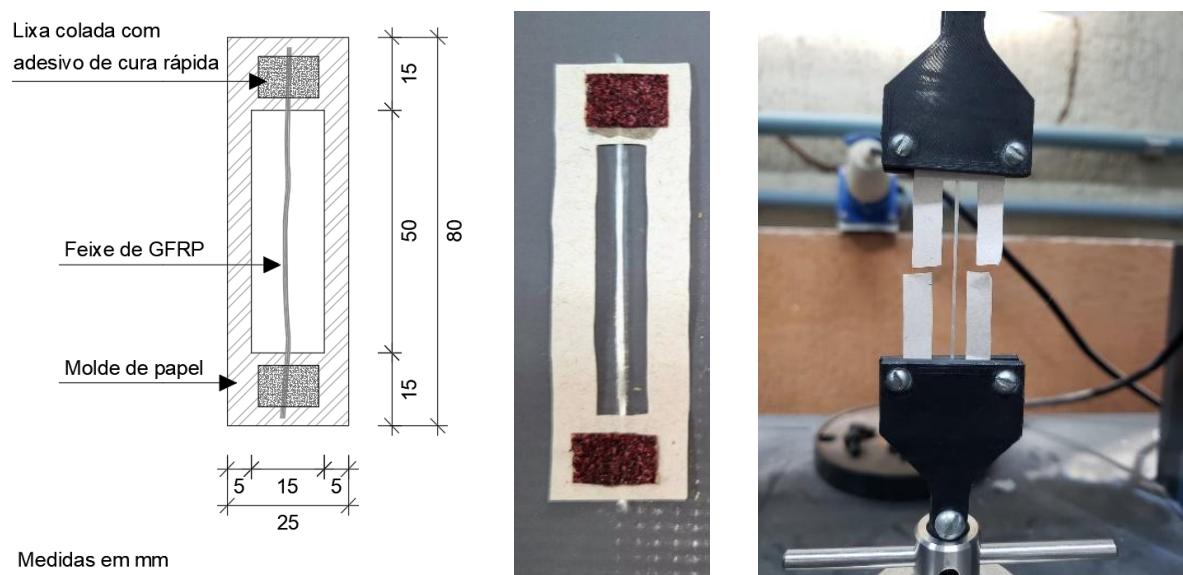
3.4. CARACTERIZAÇÃO DO REFORÇO

A caracterização do reforço ocorreu por meio de dois ensaios distintos: o ensaio de tração direta do feixe de fibras e o ensaio de tração do compósito GFRP em matriz epóxi. O primeiro ensaio tem como objetivo determinar a resistência à tração das fibras de vidro individualmente, enquanto o segundo considera os efeitos associados à não linearidade do tecido e à contribuição da matriz epóxi na transferência de tensões dentro do compósito.

3.4.1. Ensaio de tração direta do feixe de fibras de vidro (GFRP)

O ensaio de tração direta do feixe de fibras de vidro foi realizado de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM D3822 (ASTM, 2020). O ensaio foi feito em máquina universal modelo Instron, com célula de carga de 100 N e taxa de deslocamento de 0,25 mm/min. As fibras foram fixadas nas pontas em moldes de papel com cola de cura rápida e lixas, para evitar o escorregamento dos fios nas garras durante o ensaio (Figura 3.11). Este ensaio foi realizado em uma amostra composta por cinco feixes.

Figura 3.11 – Corpo de prova para ensaio de tração direta da fibra.



Fonte: Autor.

A área tracionada (A) de cada feixe foi determinada de maneira analítica, de acordo com a Equação (3.18).

$$A = \frac{m}{\rho * L} \quad (3.18)$$

sendo m a massa seca do feixe;
 ρ a densidade do feixe;
 L o comprimento do feixe.

3.5.1.1 Picnometria de gás hélio e determinação da área tracionada

O ensaio de picnometria com gás hélio foi utilizado como complemento ao ensaio de tração direta do feixe de fibras de vidro, por ser uma técnica precisa para a determinação da densidade de fibras sintéticas (Rude *et al.*, 2000). Para a realização do ensaio, foi retirada uma porção de fibras do tecido, tomada como a amostra. A amostra foi seca em estufa a 103 °C por 24 horas, e sua massa seca foi registrada (Figura 3.12a). Em seguida, o ensaio de picnometria foi realizado em um equipamento Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340 (Figura 3.12b). O resultado indicou que as fibras de vidro têm densidade igual à 2,6696 g/cm³, valor dentro da faixa para este material (Schöber *et al.*, 2015). Este valor foi considerado como homogêneo para todas as fibras de composição do tecido utilizado nesta pesquisa.

Figura 3.12 – Ensaio de picnometria de gás hélio em fibras de vidro: (a) pesagem da amostra; (b) picnômetro.



Fonte: Autor.

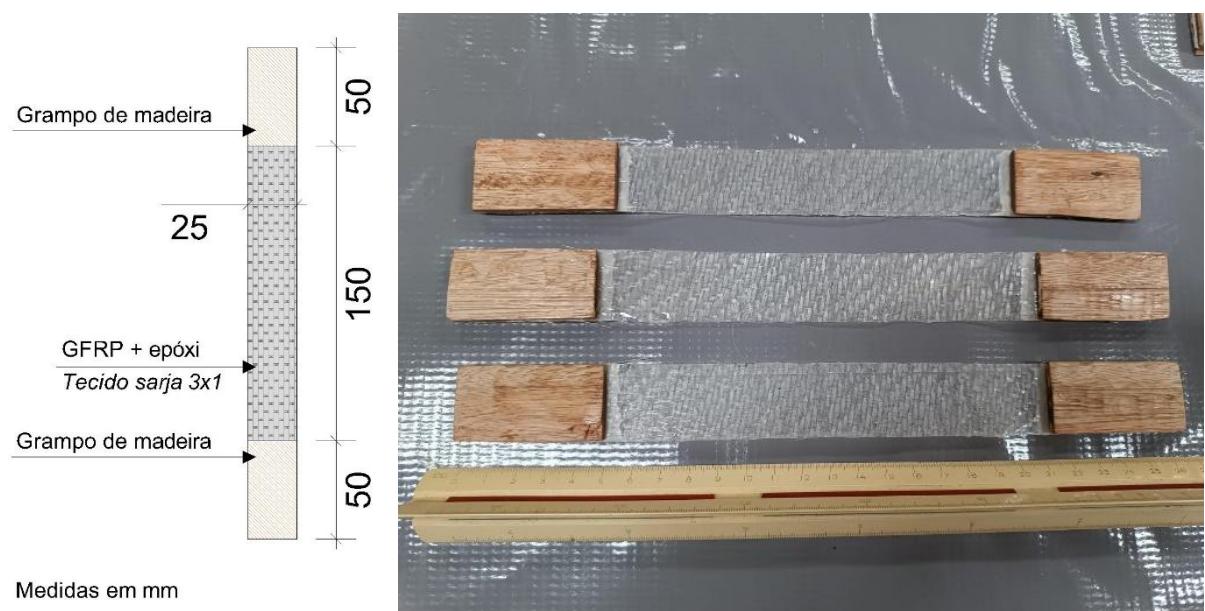
Os feixes utilizados como corpos de prova para o ensaio de tração direta foram retirados da amostra do ensaio de picnometria. Os corpos de prova foram levados à estufa à 103°C por 24 horas, em seguida a massa seca dos feixes foi determinada em balança de precisão igual à 0,0001g. Assim, a Equação (3.18) foi utilizada para se determinar a área dos feixes, o qual variou entre 0,062182 mm² e 0,77914 mm².

3.4.2. Ensaio de tração direta do GFRP em matriz epóxi

O ensaio de tração direta do compósito composto pela fibra de vidro em matriz epóxi foi realizado de acordo com os procedimentos da norma ASTM D3039 (ASTM, 2014). Este ensaio foi realizado em uma amostra composta por cinco corpos de prova. Para a preparação dos corpos de prova, foram retiradas tiras do tecido com a fita crepe protetora (Figura 3.4, pag. 84), sendo que as tiras se encontravam na mesma orientação que foi utilizado no reforço. Em seguida, foi aplicada a matriz epóxi em gramatura igual ao levantado para o reforço das cavilhas (44,7 g/m²). Após preparados, os corpos de prova foram estocados em laboratório para a cura da resina epóxi durante 28 dias.

A Figura 3.13 ilustra as dimensões e as características dos corpos de prova. Grampos de madeira foram colocados nas extremidades das tiras para evitar tensões localizadas e aumentar o atrito com a garra. O ensaio de tração direta foi feito em máquina universal modelo Instron, com célula de carga de 5 kN e taxa de deslocamento de 0,75 mm/min.

Figura 3.13 – Corpo de prova para ensaio de tração direta das fibras impregnadas com resina epóxi.



Fonte: Autor.

3.5. CARACTERIZAÇÃO DAS CAVILHAS

A caracterização das cavilhas contou com os ensaios de determinação do momento de plastificação por flexão da cavilha (FLP), compressão axial da cavilha (COMP-AX) e resistência ao embutimento (EMB). Também foi realizado um ensaio de absorção de água líquida (AB), com intensão de avaliar a capacidade higroscópica da cavilha. O resumo dos ensaios de caracterização das cavilhas, as propriedades encontradas e os métodos são apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Ensaios de caracterização do conector.

Ensaios	N	Propriedades estudadas	Método utilizado
AB	24	Coeficiente de absorção (A_w)	ASTM C1794 (ASTM, 2015)
FLP	48	Momento resistente de plastificação (M_{eff}).	ASTM D4475 (ASTM, 2021) e Thomson (2010)
COMP-AX	12	Resistência a compressão (f_{c0})	ASTM D198 (ASTM, 2014)
EMB	18	Resistência ao embutimento (f_h);	ASTM D5764 (ASTM, 2023)
AR	24	Resistência ao arrancamento (f_{ax})	Tração pura do pino

Fonte: Autor.

3.5.1. Ensaio de absorção de água

Este ensaio teve o objetivo de avaliar a capacidade de absorção capilar de água da cavilha, tendo em vista que a peça estará em contato com o concreto em estado fresco. Para atingir este objetivo, foi utilizado o método de avaliação da absorção de água por imersão total, sendo este método uma adaptação do ensaio da norma norte-americana ASTM C1794 (ASTM, 2015). O Quadro 3.3 mostra a relação de corpos de prova para o ensaio de absorção de água.

Quadro 3.3 – Informações de geometria e amostragem do ensaio de absorção de água.

d_{nom} (mm)	Reforço	Amostra
Controle	Sem reforço	6
1R Ø15±1 mm	1 camada GFRP	6
2R Comprimento = 100 mm	2 camadas GFRP	6
3R	3 camadas GFRP	6

Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram submetidos à imersão em um recipiente com água desmineralizada em uma temperatura constante de $25,2^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ durante 168 horas, havendo a troca da água do recipiente em intervalos de 2 horas (Figura 3.14). A troca da água do recipiente foi feita durante 10 horas do horário comercial (das 8h até às 18h). Ao longo da noite, os corpos de prova foram mantidos imersos ao longo de 14 horas.

A umidade inicial dos corpos de prova foi de $11,5\% \pm 1,5\%$. Os corpos de prova foram retirados periodicamente da água, enxugando o excesso de água e tiveram a massa registrada. O registro das massas variou em intervalos de 30 minutos nas primeiras 12 horas de ensaio, em seguida, este intervalo foi aumentado para a cada 60 minutos. Após 48 horas de ensaio, o intervalo de verificação da massa foi aumentado para 24 horas.

A absorção superficial de água foi calculada pela razão entre a massa de água e a área superficial de contato de cada um dos corpos de prova. O coeficiente de absorção da madeira (A_w), foi determinado pela inclinação da reta de regressão linear do gráfico de absorção superficial de água versus a raiz quadrada do tempo.

Figura 3.14 – Recipiente de ensaio com controle de umidade da temperatura da água destilada e umidade relativa do ar do ambiente.

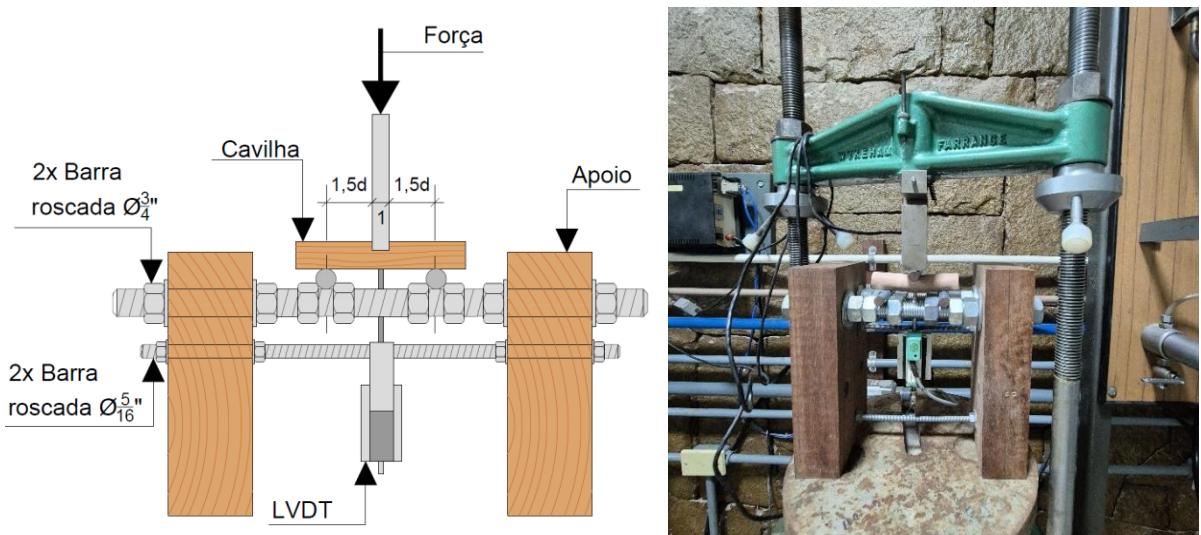


Fonte: Autor.

3.5.2. Ensaio de flexão da cavilha

A determinação do momento de escoamento se deu pelo “método da viga curta”, apresentado na norma norte-americana ASTM D4475 (ASTM, 2021) e adaptada por Thomson (2010) para conectores do tipo cavilha de madeira. O esquema de ensaio é ilustrado na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Esquema de posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão da cavilha.



Fonte: Autor.

O ensaio foi realizado em prensa de compressão modelo Wykeham Farrance, com célula de carga de 20 kN e taxa de deslocamento do cursor de 1,20 mm/min, com carregamento monotônico até a ruptura. O Quadro 3.4 mostra a relação de corpos de prova para o ensaio de flexão da cavilha, variando-se os diâmetros das cavilhas e quantidades de camadas de reforço.

Quadro 3.4 – Relação de corpos de prova para ensaio de flexão da cavilha.

Código	$d_{nom} (mm)$	Reforço	Amostragem
C16-C	16	Sem reforço	6
C16-1R	16	1 camada GFRP	6
C16-2R	16	2 camadas GFRP	6
C16-3R	16	3 camadas GFRP	6
C20-C	20	Sem reforço	6
C20-1R	20	1 camada GFRP	6
C20-2R	20	2 camadas GFRP	6
C20-3R	20	3 camadas GFRP	6

Fonte: Autor.

A formulação do momento de plastificação efetiva ($M_{y,eff}$) a partir do “método da viga curta” é demonstrada por Thomson (2010), explicada no item 2.2.3 (p. 63) deste trabalho e calculado pela Equação (3.19). A ductilidade (D) das cavilhas foi determinada de acordo com a Equação (3.20).

$$M_{y,eff} = \frac{3}{8} F_y \cdot d \quad (3.19)$$

onde F_y a força de escoamento, dada pela intersecção do ajuste bilinear, de acordo com o método EEEP;
 d o diâmetro da cavilha.

$$D = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3.20)$$

onde δ_u é o deslocamento último, tomado como o deslocamento residual em 80% da força última (F_u);
 δ_y é o deslocamento de escoamento da cavilha, dada pela intersecção do ajuste bilinear, de acordo com o método EEEP.

3.5.3. Ensaio de compressão axial da cavilha

O ensaio de compressão axial das cavilhas teve como objetivo avaliar o efeito de confinamento promovido pelas fibras de vidro na resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$), fenômeno discutido por Otoom *et al.* (2022). Para a execução do ensaio, foi adotada uma adaptação do método previsto na norma ASTM D198 (ASTM, 2014). Os ensaios foram conduzidos em uma prensa de compressão modelo Wykeham Farrance, equipada com célula de carga de 20 kN e operando com taxa de deslocamento do cursor de 1,2 mm/min.

As informações das amostras (N) e as características geométricas dos corpos de prova estão apresentadas no Quadro 3.5, organizadas conforme as variações de diâmetro das cavilhas e as respectivas camadas de reforço. As dimensões dos corpos de prova foram definidas de modo a garantir que o índice de esbeltez (l/r) permanecesse inferior a 17. Devido às limitações físicas para acoplamento de um medidor de deslocamento na região central dos corpos de prova, as deformações foram estimadas a partir do deslocamento do cursor da máquina de ensaio (Figura 3.16).

Quadro 3.5 – Informações do ensaio de compressão axial da cavilha.

Código	d_{nom} (mm)	Reforço	N	Altura (l) (mm)	Raio de giração (r)	l/r
C16-C	16	Sem reforço	3	55	4	16,25
C16-3R	16	3 camadas GFRP	3	55	4	16,25
C20-C	20	Sem reforço	3	55	5	13
C20-3R	20	3 camadas GFRP	3	55	5	13

Fonte: Autor.

Figura 3.16 – Ensaio de compressão axial da cavilha.



Fonte: Autor.

3.5.4. Ensaio de arrancamento

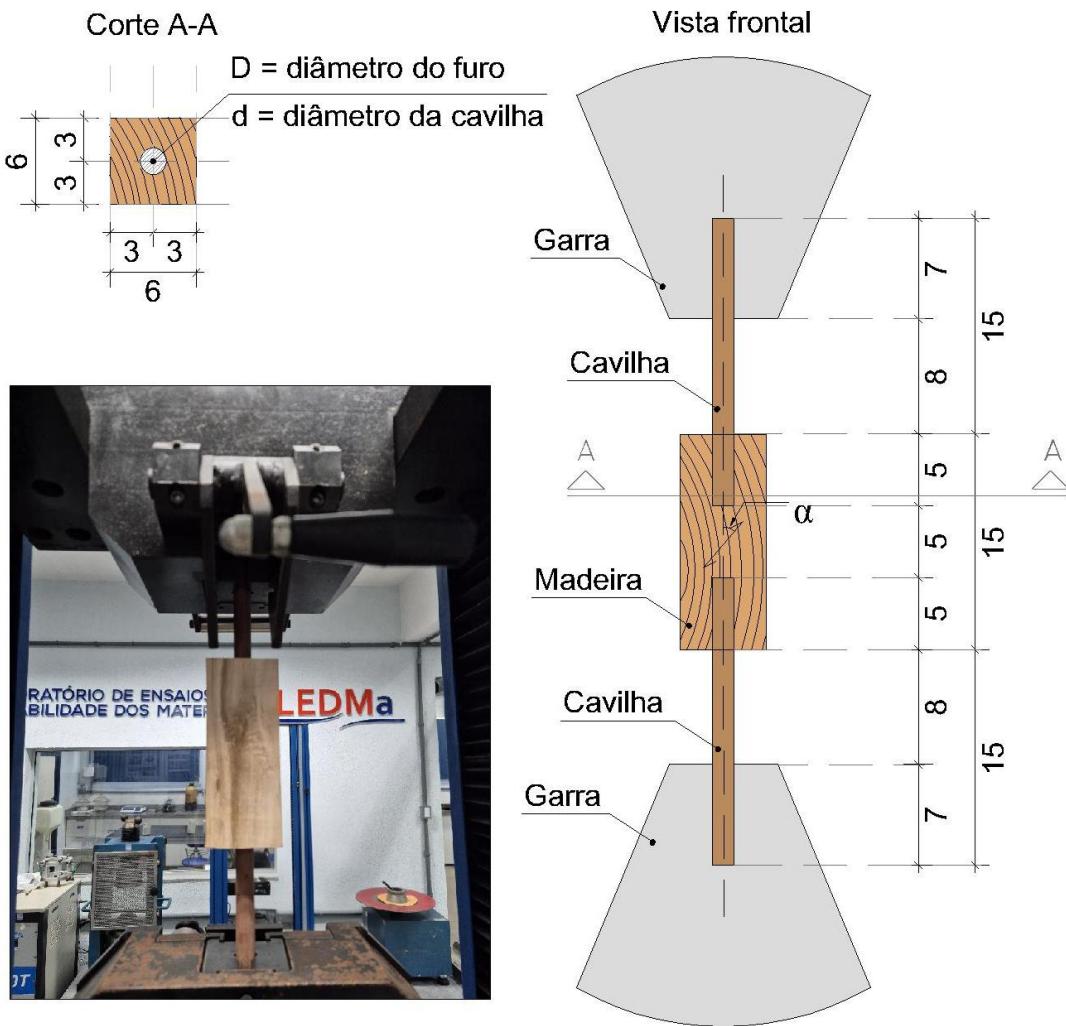
Devido à ausência de orientações normativas específicas na bibliografia, o ensaio de arrancamento das cavilhas, também conhecido como *pull-out test*, foi conduzido com base no método de tração direta de barras, conforme ilustrado na Figura 2.18a (subseção 2.2.4, p. 66). O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios Instron, com capacidade de carga de 200 kN, utilizando garras acionadas por ar comprimido. Esse sistema de acoplamento foi imprescindível para evitar o escorregamento das cavilhas, em razão de sua superfície lisa.

A taxa de incremento de deslocamento adotada foi de 2,0 mm/min, seguindo referências da literatura que abordaram ensaios semelhantes em cavilhas de madeira (Viana *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023). As dimensões dos corpos de prova e o esquema do ensaio estão apresentados na Figura 3.17. A resistência ao arrancamento (f_{ax}) foi determinada de acordo com a Equação (3.21).

$$f_{ax} = \frac{F_{ax,max,\theta}}{d \cdot l_p \cdot \pi} \quad (3.21)$$

sendo $F_{ax,max,\theta}$ a força máxima aplicada pela prensa para um ângulo θ de inserção da cavilha em relação às fibras;
 d o diâmetro da cavilha;
 l_p o comprimento de ancoragem da cavilha.

Figura 3.17 – Esquema do ensaio de arrancamento.



Fonte: Autor.

A quantidade de corpos de prova e demais informações quanto a geometria das séries estão descritas no Quadro 3.6. Como o objetivo deste estudo está relacionado à ancoragem de cavilhas aplicadas em estruturas mistas, o comprimento de ancoragem (l_p) foi limitado a 50 mm, resultando em índice de esbeltez (l_p/d) aproximadamente igual a 3. Para este ensaio, foram selecionadas cavilhas com diâmetro próximo aos valores mínimos encontrados (ver Tabela 3.3, p. 85). O diâmetro e a profundidade dos furos foram controlados com o auxílio de um paquímetro digital. Assim, foi possível estimar a espessura da linha de cola (e) a partir da diferença entre o diâmetro do furo e o diâmetro da cavilha.

O processo de fabricação dos corpos de prova teve início com a serragem da madeira nas dimensões de 6 cm × 6 cm × 15 cm (Figura 3.17). Em seguida, foram realizados os furos com o auxílio de uma furadeira de bancada. Após a perfuração, os furos foram limpos com ar comprimido e, posteriormente, preenchidos com a resina epóxi descrita na Subseção 3.1.3

(p. 84). As cavilhas foram inseridas manualmente com movimento de rotação para minimizar a formação de bolhas. A colagem foi realizada com antecedência de 28 dias, de forma a assegurar a cura completa da resina. O procedimento é ilustrado na Figura 3.18.

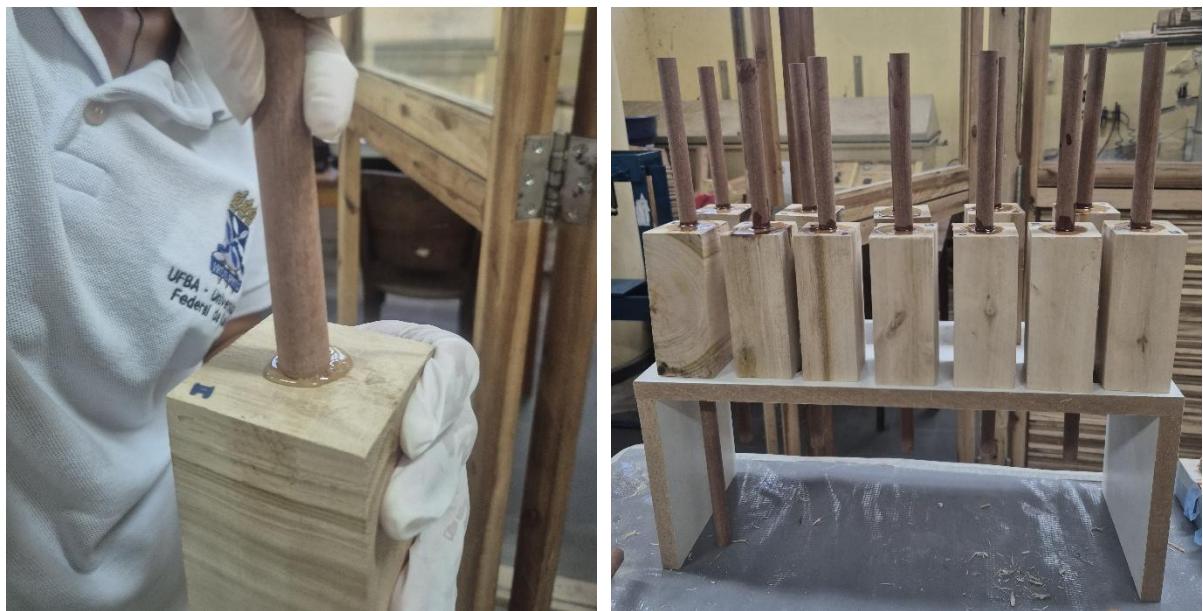
Quadro 3.6 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de arrancamento.

Código	d_{nom} (mm)	D_{nom} (mm)	e^* (mm)	l (mm)	α (°)	l_p (mm)	$\frac{l_p}{d}$	N
C16-0-5/8	16 ¹	15,88 (5/8") ²	0,28	200	0°	50 ⁴	3,25	6
C16-90-5/8	16 ¹	15,88 (5/8") ²	0,37	200	90°	50 ⁴	3,25	6
C16-0-3/4	16 ¹	19,05 (3/4") ³	1,76	200	0°	50 ⁴	2,80	6
C16-90-3/4	16 ¹	19,05 (3/4") ³	1,63	200	90°	50 ⁴	2,80	6

Legenda: d_{nom} = diâmetro nominal da cavilha. D_{nom} = diâmetro nominal do furo. e = espessura estimada da linha de cola. l = comprimento da cavilha. α = inclinação das fibras em relação à força. l_p = comprimento de ancoragem. l_p/d = relação de esbeltez aproximada. N = amostragem. ¹ O diâmetro médio das cavilhas foi de 15,87 mm. ² O diâmetro médio do furo com broca 5/8" foi de 16,52 mm. ³ O diâmetro médio do furo com broca 3/4" foi de 19,06 mm. ⁴ A profundidade média foi de 53,66 mm. * Valor calculado a partir da equação $e = d - D$.

Fonte: Autor.

Figura 3.18 – Processo de fabricação dos corpos de prova de arrancamento: inserção da cavilha e cura da resina epóxi.

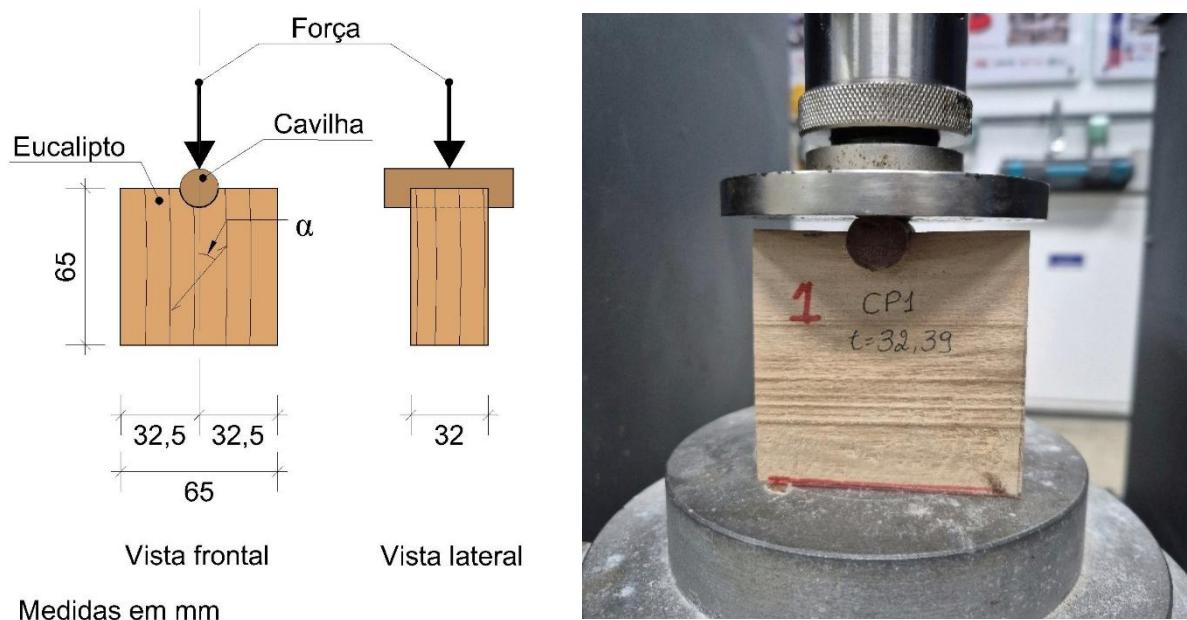


Fonte: Autor.

3.5.5. Ensaio de resistência ao embutimento

A configuração com corpo de prova em meio furo (Figura 3.19), com dimensões estabelecidas pela norma ASTM D5764 (ASTM, 2023) foi adotada no método de ensaio por permitir a geração de tensões de embutimento na madeira. O ensaio foi conduzido em uma máquina universal de ensaios Instron, com capacidade de carga de 200 kN, utilizando uma taxa de aplicação de força de 40 N/s e protocolo de carregamento segundo as orientações da norma europeia EN 383 (CEN, 2007), considerando um ciclo de carregamento entre 40% e 10% da força última estimada, anterior a aplicação de um carregamento constante até a ruptura. Os deslocamentos foram captados a partir da movimentação do cursor da prensa.

Figura 3.19 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de embutimento.



Fonte: Autor.

Todas as cavilhas ensaiadas neste ensaio não estavam reforçadas. Após os ensaios, a umidade das cavilhas e da peça de eucalipto foi determinada conforme o método estabelecido na NBR 7190-3 (ABNT, 2022). A resistência ao embutimento (f_h) foi encontrada pela Equação (3.22). As informações de amostragem (N) e demais dados referentes ao ensaio estão resumidos no Quadro 3.7.

$$f_h = \begin{cases} \frac{F_{h,5mm}}{t \cdot d} \\ \frac{F_{h0,05d}}{t \cdot d} \end{cases} \quad (3.22)$$

onde F_{h5mm} e $F_{0,05d}$ é a força capaz de provocar um deslocamento igual a 5 mm (F_{h5mm}) ou a força equivalente para um deslocamento residual de 5% do diâmetro do pino ($F_{0,05d}$), respectivamente;

t a espessura da peça de madeira;

d o diâmetro do pino.

Quadro 3.7 – Informações do ensaio de embutimento para a madeira de eucalipto.

Código	d_{nom} (mm)	α (°)	N
C16-0	16	0°	6
C16-45	16	45°	6
C16-90	16	90°	6

Fonte: Autor.

3.6. ENSAIO DO SISTEMA DE CONEXÃO (PUSH-OUT TEST)

O ensaio de cisalhamento das ligações nos elementos mistos de madeira e concreto, conhecido como *push-out test*, tem como objetivo determinar a resistência, os módulos de deslizamento e os modos de falha dos sistemas de conexão. O Quadro 3.8 relaciona a amostragem e as variáveis que foram consideradas no estudo deste ensaio.

Quadro 3.8 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de cisalhamento do sistema de conexão (*push-out test*).

Código	d_{nom} (mm)	Inclinação do pino	Reforço	l_p (mm)	Amostra
C16-45-C	16	45°	Sem reforço (Controle)	50	6
C16-45-3R	16	45°	3 camadas (3R)	50	6
C16-90-C	16	90°	Sem reforço (Controle)	50	6
C16-90-3R	16	90°	3 camadas (3R)	50	6
C20-45-C	20	45°	Sem reforço (Controle)	50	6
C20-45-3R	20	45°	3 camadas (3R)	50	6
C20-90-C	20	90°	Sem reforço (Controle)	50	6
C20-90-3R	20	90°	3 camadas (3R)	50	6

Nota: d_{nom} : diâmetro nominal da cavilha; l_p : ancoragem da cavilha na peça de eucalipto.

Fonte: Autor.

Este trabalho avaliou os sistemas de conexões com cavilhas sem reforço e com três camadas de tecido, por estas terem melhores propriedades físicas e mecânicas, de acordo com os ensaios de caracterização da cavilha. Duas configurações de conexão foram consideradas: cavilhas perpendiculares à madeira (inclinação de 90°) e cavilhas inclinadas

em relação à madeira (inclinação de 45°). A primeira configuração, 90°, foi selecionada por ser de execução mais facilitada para a prática. A segunda configuração, 45°, quando estudada em pinos metálicos, tem se mostrado com maior rigidez e resistência.

3.6.1. Execução dos corpos de prova

O início da produção dos corpos de prova contou com a serragem das toras de eucalipto em comprimentos de 30 cm eplainamento da superfície. Em seguida, as peças ficaram estocadas para a liberação das tensões de crescimento e observação quanto ao aparecimento de rachaduras. Após 15 dias, as peças foram furadas com broca chata em furadeira com guia. Os detalhes dos furos e da espessura média aproximada da linha de cola (e_{cola}) estão presentes na Tabela 3.6. Cabe ressaltar que apesar do diâmetro nominal ser de 16 mm e 20 mm, as cavilhas tinham diâmetro médio de 15,27 mm e 19,58 mm, respectivamente, permitindo a seleção de cavilhas com diâmetro compatível ao tamanho do furo.

Tabela 3.6 – Detalhes dos corpos de prova do ensaio de *push-out test*.

Código	d_{nom} (mm)	Furo \emptyset(mm)	e_{cola} (mm)
16-45-C	16	5/8" (15,88)	0,25
16-45-3R	16	3/4" (19,05)	0,40
16-90-C	16	5/8" (15,88)	0,30
16-90-3R	16	3/4" (19,05)	0,45
20-45-C	20	3/4" (19,05)	0,20
20-45-3R	20	7/8" (22,23)	0,35
20-90-C	20	3/4" (19,05)	0,30
20-90-3R	20	7/8" (22,23)	0,40

Nota: d_{nom} : diâmetro nominal da cavilha; e_{cola} : espessura média estimada da linha de cola.

Fonte: Autor.

Após a execução dos furos, as peças foram estocadas por um período de 7 a 15 dias, com o objetivo de observar o eventual aparecimento de rachaduras nas regiões perfuradas. Em seguida, os furos foram limpos e preenchidos com resina epóxi (Subseção 3.1.3, p.84). As cavilhas foram inseridas com movimentos de rotação, a fim de eliminar possíveis bolhas de ar durante o processo de colagem.

Após a cura da resina, foram confeccionadas formas de madeira de pinus tratada e as peças foram levadas para a usina de concreto, sendo aplicado o desmoldante poucas horas antes da concretagem. A concretagem dos corpos de prova foi realizada em duas camadas,

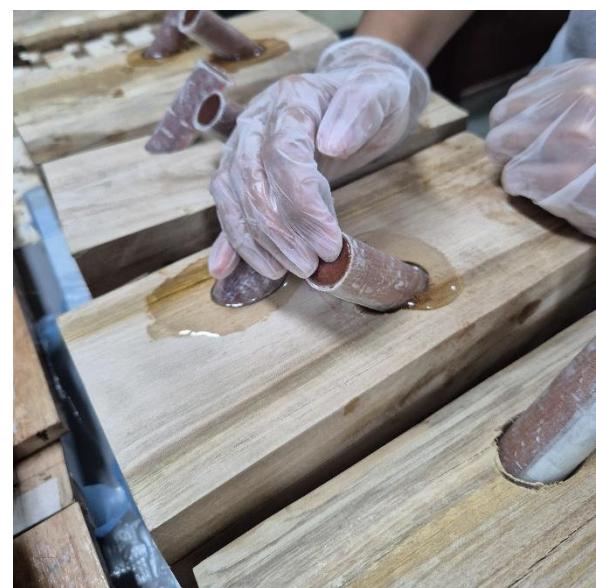
cada uma adensada manualmente com 15 golpes de haste. Em todas as peças de concreto foi inserida uma armadura de controle de fissuração com diâmetro de 3,4 mm.

Para evitar a perda de água durante os primeiros dias de cura, o topo das formas foi vedado com papel adesivo. Após sete dias, as formas foram removidas e a superfície do concreto foi mantida úmida por mais sete dias, com a aspersão periódica de água, a fim de garantir a adequada cura do material. Todo o processo de moldagem e cura está ilustrado na sequência de imagens da Figura 3.20.

Figura 3.20 – Processo de confecção dos corpos de prova para o ensaio de *push-out test*.



(a) lançamento de resina epóxi no furo;



(b) posicionamento da cavilha;



(c) aplicação de desmoldante;

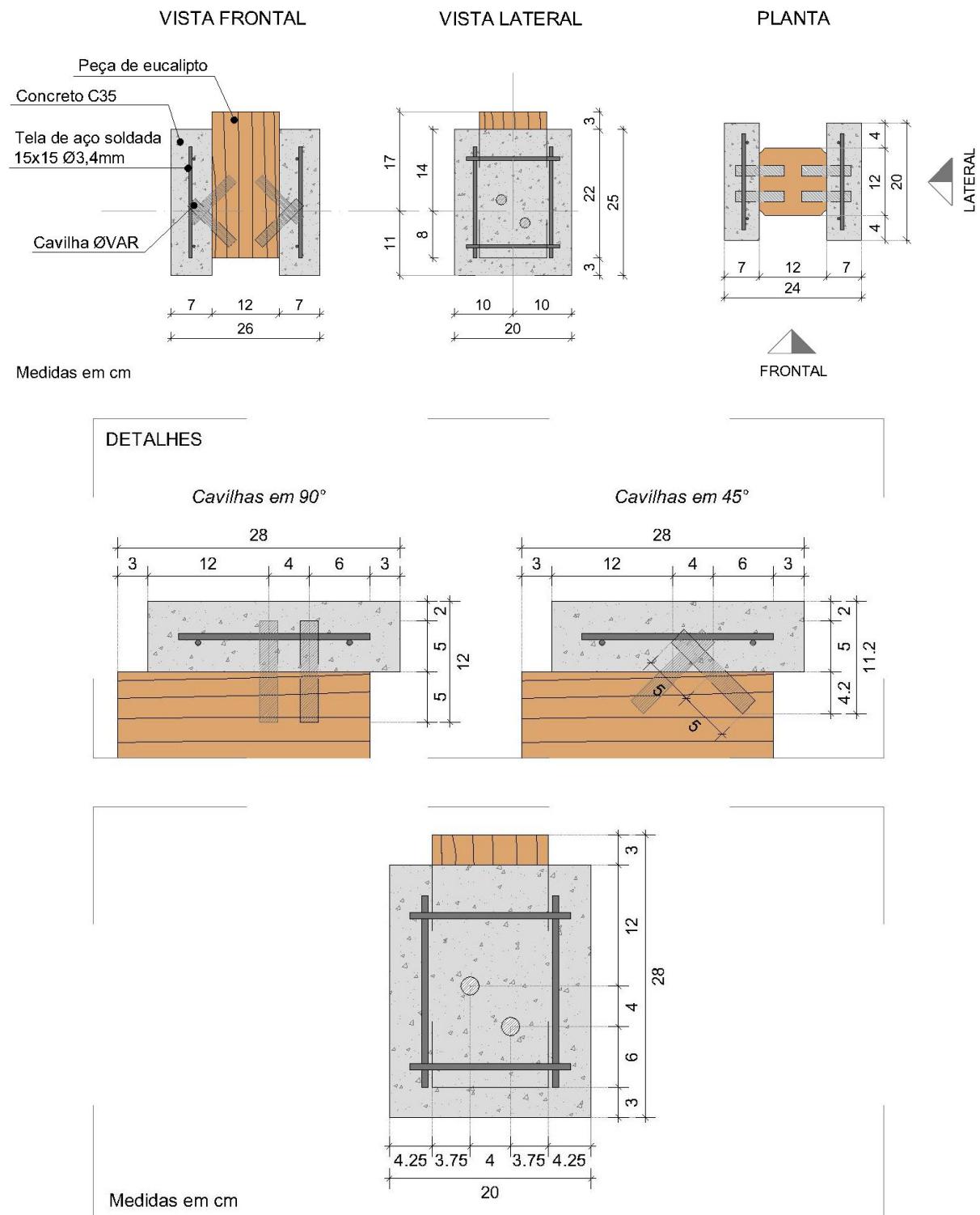


(d) estoque para a cura do concreto.

Fonte: Autor.

A Figura 3.21 apresenta o esquema do corpo de prova utilizado no ensaio *push-out test*, com suas respectivas dimensões. A parte de concreto foi executada com espessura de 7 cm, valor mínimo recomendado para lajes maciças segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023).

Figura 3.21 – Esquema do ensaio *push-out test*: dados geométricos do corpo de prova.



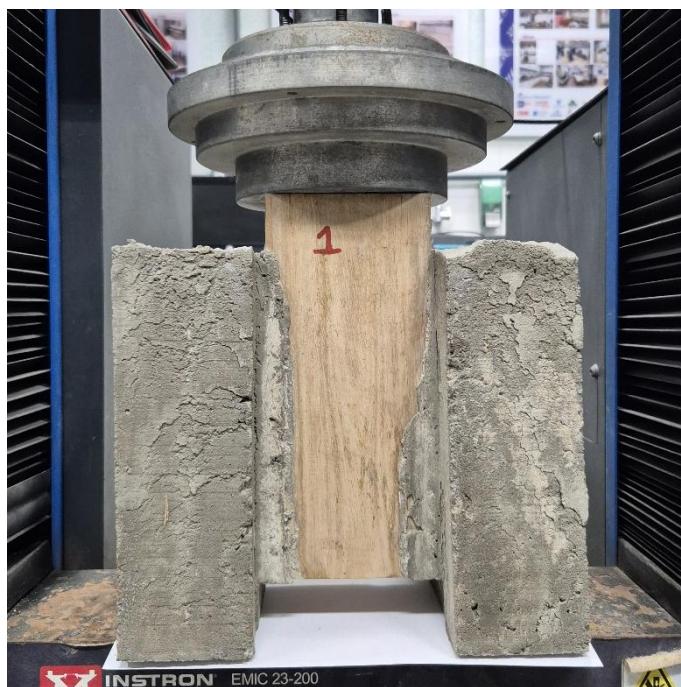
Fonte: Autor.

3.6.2. Procedimento do ensaio de push-out

O procedimento de aplicação da força, a configuração do corpo de prova e a medição dos deslocamentos foram definidos com base em boas práticas descritas na literatura (ver subseção 2.1.5, p. 47). Optou-se pela utilização do corpo de prova de cisalhamento duplo, composto por uma peça central de madeira e dois apoios de concreto. O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios Instron, com capacidade de carga de 200 kN. Os deslocamentos foram registrados com base na movimentação do prato da máquina.

A força foi aplicada com taxa constante de 5 kN/min até a ruptura do corpo de prova. O protocolo de carregamento seguiu o procedimento estabelecido pela norma europeia EN 26891 (CEN, 1991), que prevê um ciclo inicial de carga e descarga entre 10% e 40% da força máxima estimada antes da aplicação do carregamento contínuo até a falha (Figura 3.23a). A Figura 3.22 apresenta o esquema do ensaio.

Figura 3.22 – Esquema de ensaio de *push-out* para corpos de prova mistos de madeira e concreto.



Fonte: Autor.

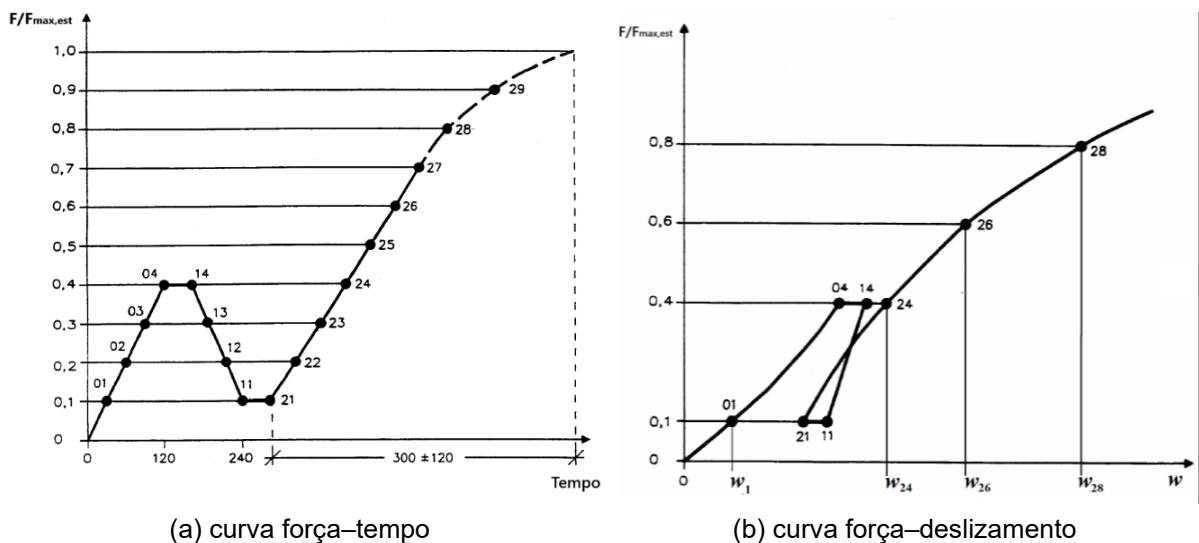
As variáveis de resistência e rigidez foram determinadas e analisadas conforme as diretrizes apresentadas nas subseções 2.1.3 e 2.1.4 da revisão teórica. O módulo de deslizamento da ligação (K_i) foi calculado por meio da Equação (3.23). Neste trabalho, os valores de módulo de deslizamento foram determinados em dois instantes específicos: $F_{40\%} = 0,4F_u$ e $F_{60\%} = 0,6F_u$, sendo F_u a força máxima aplicada, correspondente aos pontos 01, 04 e 28 das curvas ilustradas na Figura 3.23. Os resultados de força e deslizamento estão descritos

para cada par de conectores. Os valores detalhados para cada corpo de prova são apresentados no Apêndice A.

$$K_i = \frac{(F_i - F_{10\%})}{(v_i - v_{10\%})} \quad (3.23)$$

sendo F_i a força aplicada pela prensa em um instante i ;
 v_i deslizamento correspondente à força F_i ;

Figura 3.23 – Diagramas força–tempo e força–deslocamento para o *push-out test*.



Fonte: EN 26891 (CEN, 1991), p. 8–9.

3.7. TRATAMENTO ESTATÍSTICO

A descrição dos dados foi feita a partir do cálculo da média aritmética, do desvio padrão e do coeficiente de variação. A média (\bar{x}) representa o valor central da amostra e foi obtida pela soma de todos os valores dividida pelo número total de observações, conforme a Equação (3.24).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.24)$$

sendo x_i é o valor do corpo de prova i ;
 n é o número de amostra.

O desvio padrão (DP) que expressa a dispersão dos dados em relação à média, sendo calculado por meio da Equação (3.25).

$$DP = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.25)$$

O coeficiente de variação (*CV*) indica a variabilidade relativa dos dados em relação à média e permite a comparação da dispersão entre diferentes conjuntos de dados. O coeficiente de variação foi calculado pela Equação (3.26).

$$CV = \frac{DP}{\bar{x}} * 100\% \quad (3.26)$$

Para a comparação entre grupos foi utilizado o teste t de *Student*, a qual consiste em formular um hipóteses para testar a igualdade das médias entre duas amostras, as quais são:

$H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ Hipótese nula: a média dos grupos são iguais.

$H_1: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ Hipótese alternativa: a média dos grupos são diferentes.

O teste consiste na comparação entre o valor da estatística t e um valor. Para testes de grupos pareados independentes, a estatística t foi calculada pela Equação (3.27). Para teste de grupos independentes, foi utilizada a Equação (3.28).

$$t = \bar{d} * \frac{\sqrt{n}}{s_d} \quad (3.27)$$

Em que \bar{d} é a diferença entre os pares de observações;

s_d é o desvio padrão das diferenças, calculadas pela Equação (3.25), considerando d_i e \bar{d} .

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - \Delta_0}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (3.28)$$

Em que \bar{x}_i são as médias amostrais;

s_i são as variâncias das amostras;

n_i são os números amostrais;

Δ_0 a diferença hipotética entre duas médias da população.

Os valores obtidos da estatística t foram comparados ao valor crítico da distribuição t de Student com $n - 1$ graus de liberdade, considerando um teste bicaudal com significância de $\alpha = 0,05$. A hipótese nula foi rejeitada quando $|t| > t_{crítico}$, indicando diferença significativa entre os dois conjuntos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos ao longo do programa experimental, organizados em três partes principais. A primeira parte trata da caracterização das matérias-primas utilizadas na pesquisa, especificamente a madeira (*Manilkara spp.* e *Eucalyptus cloeziana*), o concreto e as fibras de vidro. Em seguida, são expostos os resultados dos ensaios de caracterização das cavilhas. Por fim, são apresentados os resultados do ensaio de cisalhamento das ligações mistas de madeira e concreto (*push-out test*).

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

4.1.1. Caracterização das madeiras

4.1.1.1 Propriedades físicas

Os resultados médios (\bar{x}) da caracterização física das espécies de madeira são apresentados na Tabela 4.1, acompanhados dos valores de desvio padrão (DP), indicados entre parênteses, e dos coeficientes de variação (CV), apresentados entre colchetes. A comparação entre as médias das espécies foi realizada por meio de análise de variância (ANOVA), combinada com o teste de Tukey. A normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk.

Tabela 4.1 – Resultado das propriedades físicas e de estabilidade dimensional das madeiras.

Madeira		U(%)	ρ_U (kg/m³)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m³)	$\varepsilon_{r,1}$ (%)	$\varepsilon_{r,2}$ (%)	$\varepsilon_{r,3}$ (%)	$\varepsilon_{r,3}/\varepsilon_{r,2}$
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	\bar{x}	16,28 a	798 a	781 a	0,35 a	4,58 a	5,95 a	1,30 a
	DP	1,09	49	45	0,14	0,91	0,84	0,33
	CV	6%	6%	5%	40%	19%	14%	24%
<i>Manilkara spp.</i>	\bar{x}	14,92 a	1.186 b	1.254 a	0,45 a	4,01 a	5,00 a	1,29 a
	DP	0,92	61	67	0,14	0,77	0,58	0,33
	CV	6%	5%	5%	30%	19%	11%	25%

Legenda: \bar{x} : média; DP : desvio padrão; CV : coeficiente de variação; $U(%)$: umidade; ρ_U : densidade na umidade de ensaio; $\rho_{ap,12\%}$: densidade aparente na condição-padrão; $\varepsilon_{r,1}$: coeficiente de retração longitudinal; $\varepsilon_{r,2}$: coeficiente de retração radial; $\varepsilon_{r,3}$: coeficiente de retração tangencial. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey para 5% de probabilidade.

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.1, o teor de umidade das amostras foi de 16,28% para as peças de eucalipto e 14,92% para as de maçaranduba. Estes valores indicam que as madeiras se encontravam em equilíbrio higroscópico com o ambiente que foram estocadas, considerando uma umidade relativa média anual em torno de 75% ($UR_{anual,m} \approx 75\%$).

Em relação à densidade aparente na condição padrão ($\rho_{ap,12\%}$), o valor obtido para a madeira de eucalipto foi de 781 kg/m³. Este resultado está em conformidade com os dados da literatura para a espécie *Eucalyptus cloeziana*, cujos valores variam entre 770 kg/m³ e 916 kg/m³, conforme estudos realizados com árvores de 6,5 a 37 anos (Alves *et al.*, 2017; Pertuzzatti *et al.*, 2017; Marini *et al.*, 2022a; Marini *et al.*, 2022b). Os autores observam que os valores de densidades mais elevadas indicam menor presença de lenho juvenil, resultando em maior estabilidade física e mecânica da madeira. Li *et al.* (2017) sugerem que árvores de *E. cloeziana* com diâmetro à altura do peito (DAP) entre 15,53 cm e 19,21 cm possuem idade estimada entre 6,5 e 8,5 anos. Considerando os baixos ciclos de rotação dos plantios comerciais no Brasil, é possível inferir que a madeira de eucalipto utilizada nesta pesquisa apresenta maior proporção de lenho juvenil, o que justifica seu valor de densidade próximo ao limite inferior encontrado na bibliografia.

Para a madeira de maçaranduba, a densidade aparente determinada foi de 1.254 kg/m³, valor superior ao intervalo usualmente reportado para espécies do gênero *Manilkara spp.* (874 kg/m³ a 1.143 kg/m³), , conforme estudos de Araujo *et al.* (2020), Silveira *et al.* (2013), Martins *et al.* (2025) e Rodrigues *et al.* (2022). Essa densidade elevada está associada à baixa porosidade e à maior espessura da parede celular, características típicas da madeira de maçaranduba (Silveira *et al.*, 2013; Nascimento *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2025).

Quanto à retração longitudinal, ambas as espécies apresentaram comportamento típico de madeiras, com valores inferiores a 0,9%. Para os sentidos radial e tangencial, é conveniente a análise pelo coeficiente anisotrópico ($\varepsilon_{r,3}/\varepsilon_{r,2}$). Segundo Alves *et al.* (2017), as madeiras com coeficiente anisotrópico entre 1,2 e 1,5, faixa da qual as espécies estudadas se encontram, tendem a apresentar menor propensão a defeitos durante o beneficiamento.

Tal capacidade de estabilidade dimensional da madeira de maçaranduba permitiu maior aproveitamento da seção transversal durante o desdobra, sem descarte de cavilhas por defeitos como tortuosidade, empenamento ou rachaduras. No caso do eucalipto, embora tenha havido menor incidência de defeitos por tortuosidade, observou-se maior tendência ao aparecimento de rachaduras decorrentes da liberação de tensões de crescimento durante o desdobra.

4.1.1.2 Propriedades mecânicas

Os resultados médios (\bar{x}) e característicos (k) obtidos nos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras, flexão em quatro pontos e cisalhamento paralelo às fibras estão apresentados na Tabela 4.2, bem como os valores de desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas das madeiras.

Madeira		f_{c0} (MPa)	E_{c0} (GPa)	f_M (MPa)	E_0 (GPa)	f_{v0} (MPa)
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	\bar{x}	44,42	13,01	81,50	14,41	8,13
	DP	4,75	3,24	16,39	3,50	0,96
	CV	10%	24%	20%	24%	11%
<i>Manilkara spp.</i>	k	40,46	9,37	64,55	8,98	7,38
	\bar{x}	73,22	21,52	113,61	23,80	14,79
	DP	4,61	5,76	20,31	2,30	2,35
	CV	6%	26%	17%	9%	15%
	k	70,62	15,06	98,22	16,93	11,98

Legenda: \bar{x} : média; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; k : valor característico do lote; f_{c0} : resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0} : módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras; f_M : resistência à flexão; E_0 : módulo de elasticidade na flexão; f_{v0} : resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Fonte: Autor.

De acordo com os critérios estabelecidos pela norma brasileira NBR 7190-1 (ABNT, 2022), a madeira de eucalipto foi classificada na classe D60 com base em sua resistência característica à flexão ($f_{M,k}$), conforme a tabela de classificação para espécies exóticas oriundas de florestas plantadas. A madeira de maçaranduba também foi enquadrada na classe D60, porém com base em sua resistência à compressão paralela às fibras. Cabe destacar, entretanto, que apesar de ambas pertencerem à mesma classe mecânica segundo a nomenclatura normativa, os critérios mínimos exigidos para cada propriedade são distintos. Além disso, os valores de resistência obtidos para a madeira de maçaranduba foram significativamente superiores aos do eucalipto.

Os resultados obtidos para a madeira de maçaranduba estão em conformidade com os valores reportados em estudos anteriores (Araujo *et al.*, 2020). Os elevados valores de resistência mecânica e densidade observados para a madeira de maçaranduba (Tabela 4.1 e Tabela 4.2) a tornam adequada para a fabricação de cavilhas, uma vez que os estudos sobre o tema apontam que as propriedades do conector devem ser superiores às do material

conectado, a fim de garantir o desempenho estrutural da ligação (Mehra, 2020; Namari *et al.*, 2021; Ruan *et al.*, 2022; Camargo, 2023).

4.1.2. Caracterização do concreto

A Tabela 4.3 traz os resultados de resistência à compressão axial e o módulo estático de elasticidade da amostra ensaiada. A Tabela 4.4 traz os resultados de determinação do módulo de elasticidade pelos métodos da propagação de ondas ultrassônicas e pelo método da frequência natural de vibrações.

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de compressão axial para o concreto com 28 dias de idade.

	f_c (MPa)	f_{ck} (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_{cs} (GPa)
\bar{x}	45,59	40,90	58,17	52,49*
δ	2,84	-	10,59	9,55
CV	6,24	-	18%	18%

Legenda: f_c = resistência a compressão. f_{ck} = resistência característica à compressão. E_{ci} = módulo de elasticidade inicial. E_{cs} = módulo de elasticidade secante. \bar{x} = média. δ = desvio padrão.

*Valores obtidos analiticamente pela equação presente na NBR 6118 (ABNT, 2023) (ver item 3.3, p. 94).

Fonte: Autor.

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e estimativa do módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) para o concreto com 28 dias de idade.

	V (km/s)	ρ (g/cm ³)	E_d ¹ (GPa)	E_{ci} ¹ (GPa)	E_{ci} ² (MPa)
\bar{x}	4,78	2,38	48,98	41,72*	41,12
δ	0,08	0,07	2,68	2,26	2,22
CV	1%	2%	5%	5%	4%

Legenda: ¹Método da propagação das ondas ultrassônicas. ²Método da frequência natural de vibração. V = velocidade. ρ = massa específica do concreto. E_d = módulo de elasticidade dinâmico. \bar{x} : média; δ = desvio padrão.

*Valores obtidos analiticamente pelo Modelo de Popovics (ver item 3.3, p. 94).

Fonte: Autor.

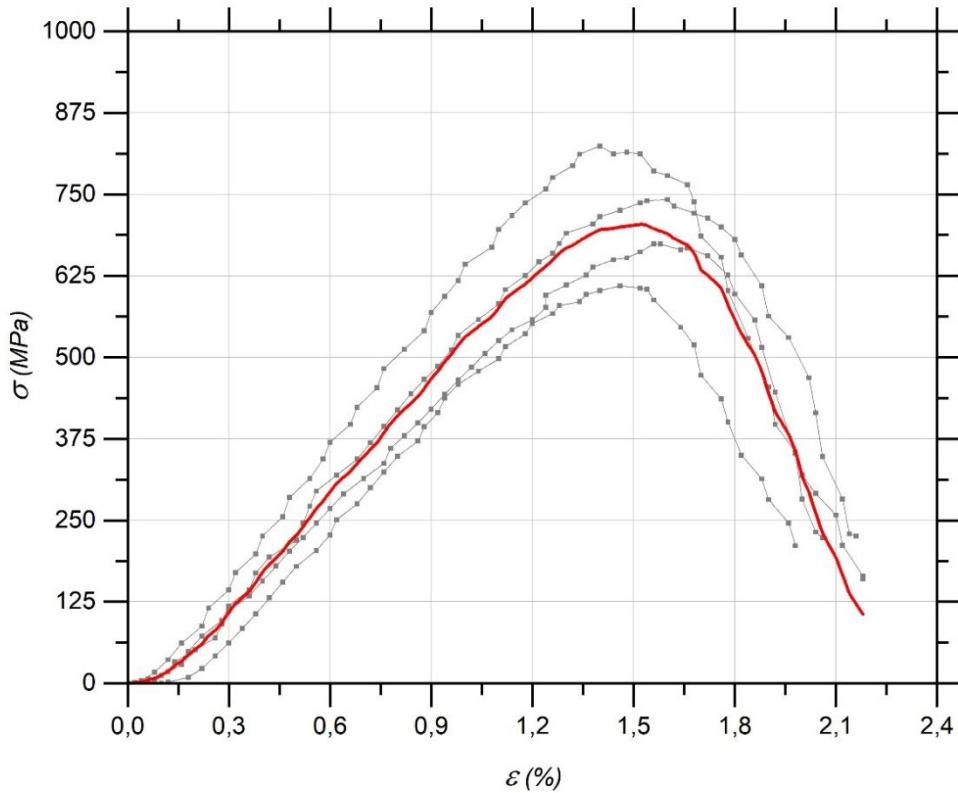
Os resultados obtidos demonstram que o concreto utilizado neste trabalho apresenta resistência compatível com a classe C40, conforme esperado para corpos de prova com 28 dias de idade. Considerando a presença de sílica ativa em sua composição, é esperado que a resistência à compressão continue a aumentar ao longo do tempo, devido à reação pozolânica. Em relação aos módulos de elasticidade, os valores variaram significativamente em função do método adotado. Devido a fatores relacionados à execução dos ensaios, como

o posicionamento dos extensômetros e o eventual deslizamento do compressômetro, os coeficientes de variação (CV) obtidos nos ensaios estáticos foram superiores aos verificados para o módulo de elasticidade dinâmico. Os métodos não destrutivos foram mais precisos para a determinação do módulo de elasticidade inicial.

4.1.3. Caracterização do reforço de fibra de vidro

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 ilustram, respectivamente, as curvas individuais e a curva média de tensão–deformação específica obtidas nos ensaios de tração direta dos feixes de fibra de vidro e dos compósitos com matriz epóxi (GFRP). A Tabela 4.5 apresenta o resumo estatístico dos resultados de resistência à tração e do módulo de elasticidade dos feixes de fibra de vidro e do compósito de GFRP. Por fim, a Figura 4.3 e a Figura 4.4 ilustram os modos típicos de ruptura observados nos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração direta.

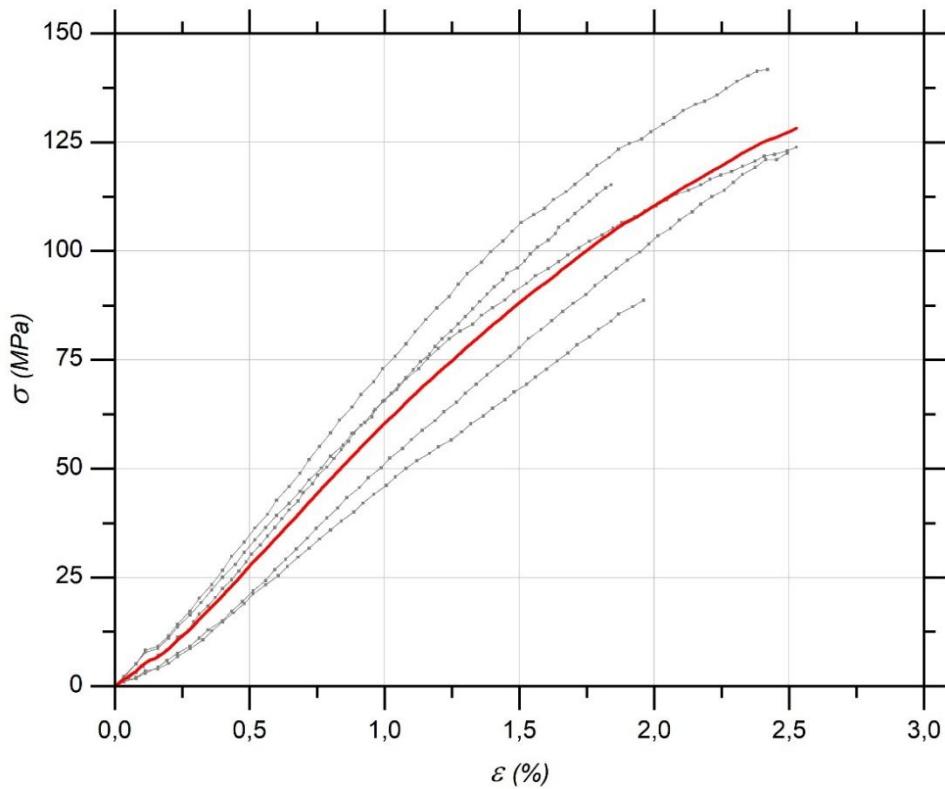
Figura 4.1 – Curva tensão–deformação específica do ensaio de tração do feixe de fibra de vidro.



Legenda: σ = tensão. ε = deformação específica.

Fonte: Autor.

Figura 4.2 – Curva tensão–deformação específica do ensaio de tração do compósito fibra de vidro em matriz epóxi.



Legenda: σ = tensão. ε = deformação específica.

Fonte: Autor.

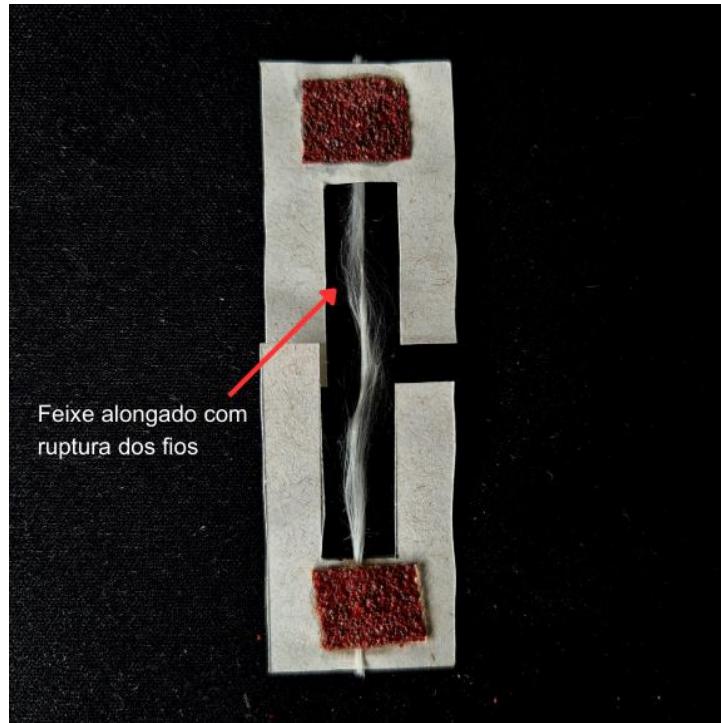
Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de tração do fio de fibra de vidro e do compósito de fibra de vidro em matriz epóxi.

		f_t (MPa)	E (GPa)	ε_{max} (%)
Feixe de fibras de vidro	\bar{x}	710,23	58,48	1,52
	DP	75,62	6,00	0,07
	CV	10%	10%	4%
GFRP	\bar{x}	128,21	6,10	2,52
	DP	19,25	0,95	0,32
	CV	16%	15%	14%

Legenda: \bar{x} = média. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação. f_t = resistência à tração. E = módulo de elasticidade. ε_{max} = deformação específica máxima (alongamento).

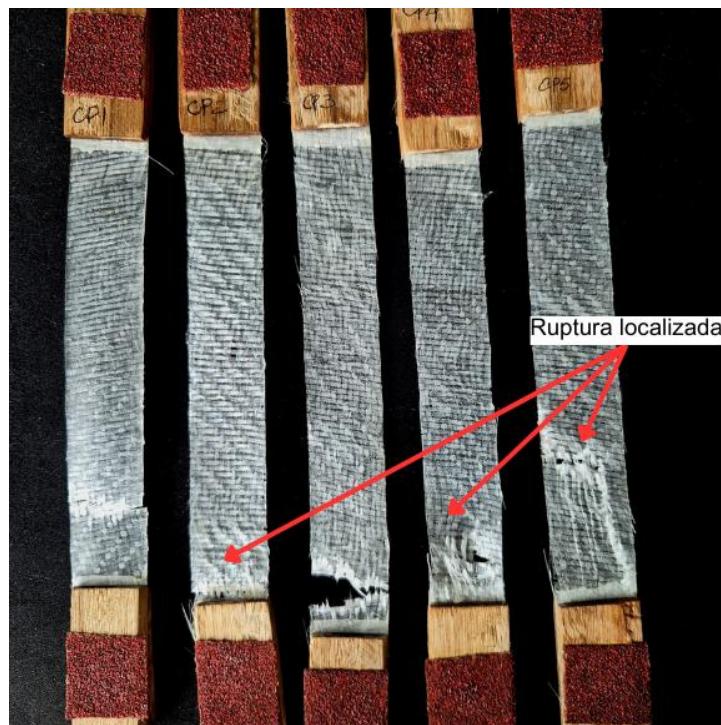
Fonte: Autor.

Figura 4.3 – Ruptura típica do ensaio de tração direta dos feixes de fibra de vidro.



Fonte: Autor.

Figura 4.4 – Ruptura típica do ensaio de tração direta do GFRP.



Fonte: Autor.

Para os feixes de fibras de vidro, a curva média possui característica típica do material, possuindo um trecho predominantemente elástico, seguido de ruptura frágil. Por ser um feixe, a falha ocorreu por ruptura progressiva dos fios (Figura 4.3), não havendo incremento de

resistência adicional após a ruptura do primeiro fio. A ruptura progressiva dos fios pode ser observada pelo pequeno patamar após atingir a tensão máxima.

Os resultados mostram que a resistência média à tração da fibra foi de 710,23 MPa. Devido à grande variabilidade das formas de fabricação e propriedades químicas das fibras de vidro, a comparação direta com dados da literatura é complexa. No entanto, o valor obtido encontra-se dentro da faixa esperada para esse tipo de material, que varia entre 500 MPa e 1.500 MPa para fibras dos tipos E, S e AR (Siddiqui *et al.*, 2010; Karimi e Javadpour, 2018).

No ensaio do compósito GFRP, a curva típica apresentou um comportamento elástico-linear praticamente até a ruptura. Em alguns corpos de prova, como o CP3, CP4 e CP5, foi possível observar uma leve variação na inclinação da curva. Esse comportamento pode ser atribuído à orientação não totalmente linear dos feixes no tecido, o que provoca uma distribuição não uniforme das tensões e resulta em solicitações localizadas sobre determinados feixes. Como também reflete que a quantidade de matriz é insuficiente para a transferência de esforços entre os feixes.

A Figura 4.4 mostra que os corpos de prova que apresentaram um trecho com comportamento aparentemente plástico exibiram ruptura localizada, com feixes de fibra não solicitados. Esses modos de ruptura indicam que a distribuição de tensões ao longo do compósito não foi uniforme, o que pode ser atribuído à dificuldade de manter os feixes lineares e paralelos durante a fabricação manual do reforço. Diante disso, infere-se que o uso de um maior número de camadas de reforço pode contribuir para reduzir as imperfeições decorrentes tanto da técnica de fabricação quanto das características da matéria-prima utilizada. Resultados semelhantes foram observados nos compósitos produzidos por Li e Hadigheh (2025) e Nagaraja *et al.* (2020).

A tensão média de ruptura do compósito foi de 128,21 MPa e o módulo de elasticidade médio foi de 6,10 GPa (Figura 4.2 e Tabela 4.5). Estes valores diferem dos encontrados na literatura, que variam entre 840 MPa e 1.247 MPa (Fiorelli, 2008; Miotto, 2009; Fernandes, 2022), cujos estudos utilizaram tecidos com densidade superficial de aproximadamente 900 g/m². A diferença significativa nos valores de resistência pode ser atribuída às propriedades do tecido. Ansari *et al.* (2020) mostraram que tecidos com densidade superficial de 210 g/m² apresentam resistência à tração cerca de 52% inferior à de tecidos com 610 g/m². Outros estudos que utilizaram tecidos com densidades próximas à empregada neste trabalho apresentaram resistência à tração variando entre 25 MPa e 434 MPa, considerando tecidos bidimensionais em matrizes epóxi com densidade superficial entre 170 g/m² e 611 g/m² (Nagaraja *et al.*, 2020; Vetter, 2022; Li e Hadigheh, 2025).

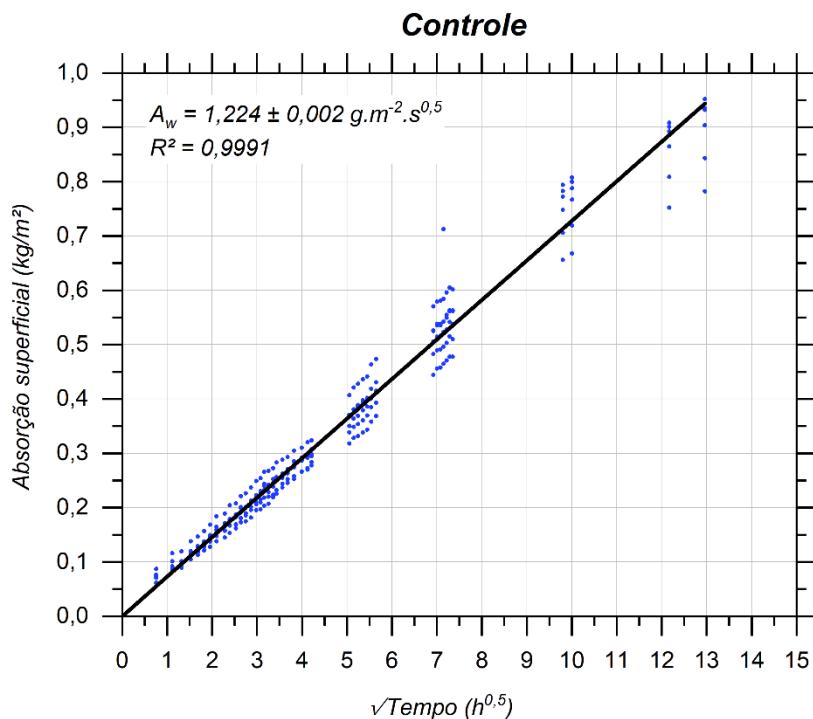
Cabe ressaltar que as propriedades da matriz polimérica e o aumento no número de camadas de reforço podem resultar em melhorias significativas no desempenho do compósito. Neste trabalho, a menor densidade superficial do tecido resultou em um material mais maleável, o que facilitou o processo de envolvimento das cavilhas circulares. Ainda assim, a resistência média à tração do compósito foi superior às propriedades da madeira, confirmando sua viabilidade como material de reforço.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS CAVILHAS

4.2.1. Absorção de água

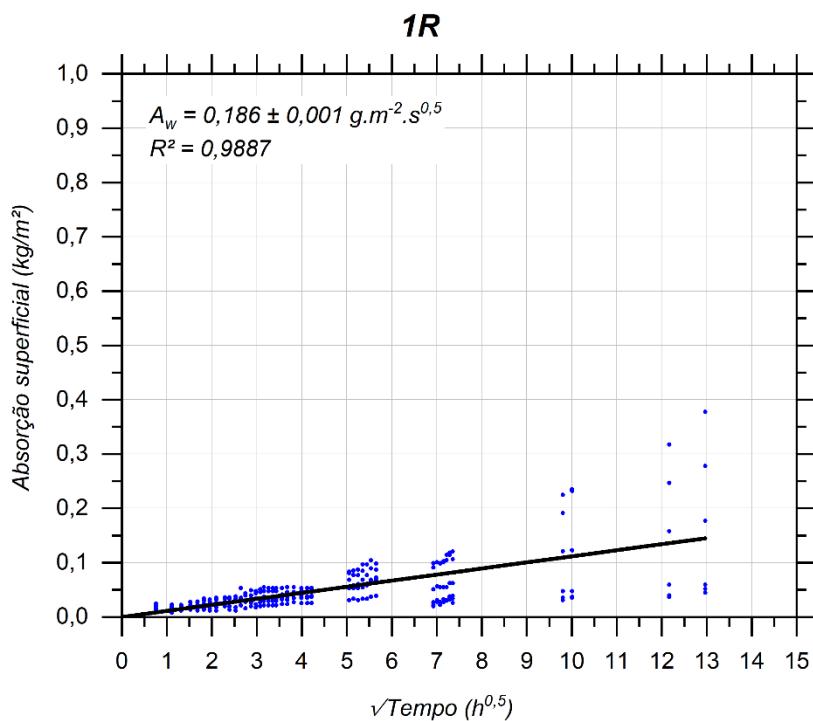
As figuras a seguir ilustram a absorção superficial de água ao longo da raiz quadrada do tempo das cavilhas para os grupos: sem reforço (controle) (Figura 4.5), com uma camada de fibra de vidro (1R) (Figura 4.6), com duas camadas de fibra de vidro (2R) (Figura 4.7) e com três camadas de fibra de vidro (3R) (Figura 4.8). As figuras ilustram o valor médio do coeficiente de absorção (A_w) e o coeficiente de determinação para cada grupo.

Figura 4.5 – Absorção superficial de água ao longo da raiz quadrada do tempo com valor médio de coeficiente de absorção (A_w): grupo controle.



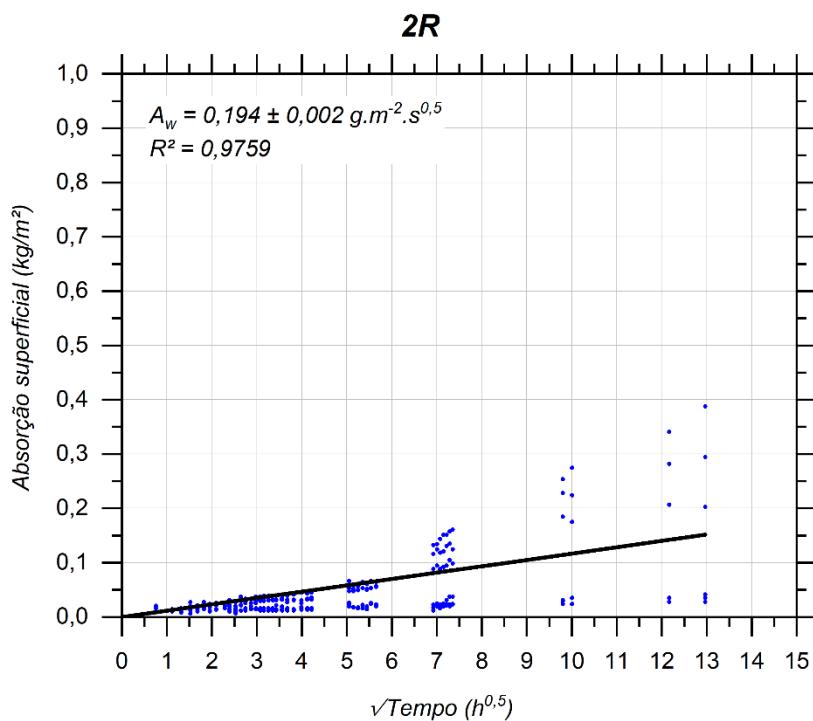
Fonte: Autor.

Figura 4.6 – Absorção superficial de água ao longo da raiz quadrada do tempo com valor médio de coeficiente de absorção (A_w): grupo com uma camada de reforço (1R).



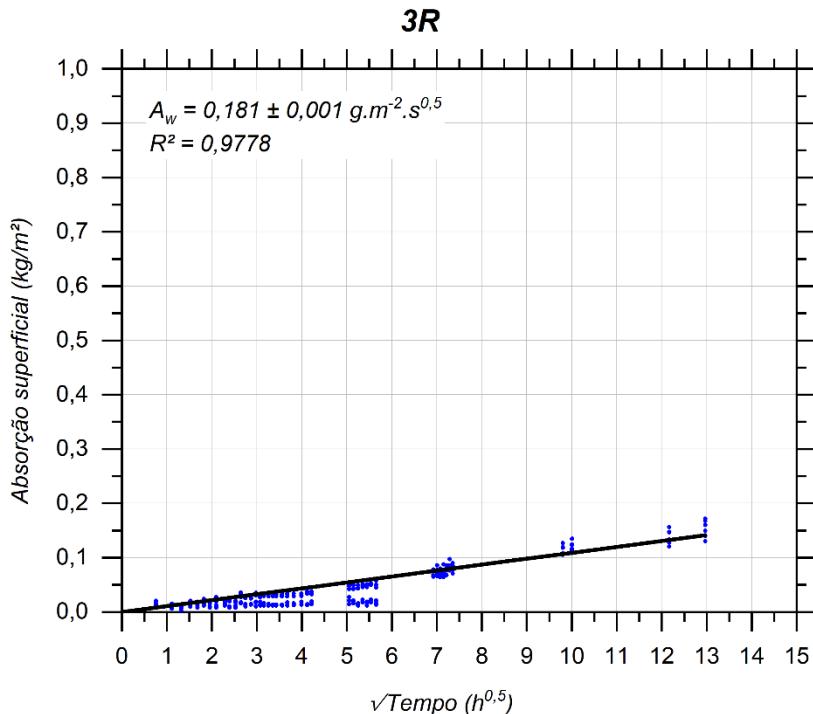
Fonte: Autor.

Figura 4.7 – Absorção superficial de água ao longo da raiz quadrada do tempo com valor médio de coeficiente de absorção (A_w): grupo com duas camadas de reforço (2R).



Fonte: Autor.

Figura 4.8 – Absorção superficial de água ao longo da raiz quadrada do tempo com valor médio de coeficiente de absorção (A_w): grupo com três camadas de reforço (3R).



Fonte: Autor.

O coeficiente de absorção capilar (A_w) é utilizado como parâmetro para avaliar a velocidade de transporte de líquidos em materiais porosos. Para a cavilha de maçaranduba sem reforço (grupo controle), o valor de A_w foi de $1,224 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{s}^{0,5}$, valor considerado baixo em comparação com outras madeiras. Estudos da literatura reportam valores variando entre $2,05 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{s}^{0,5}$ e $4,98 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{s}^{0,5}$ para diversas espécies comerciais pertencentes ao grupo SPF (*Spruce-Pine-Fir*) (Kordziel *et al.*, 2020; Glass *et al.*, 2024).

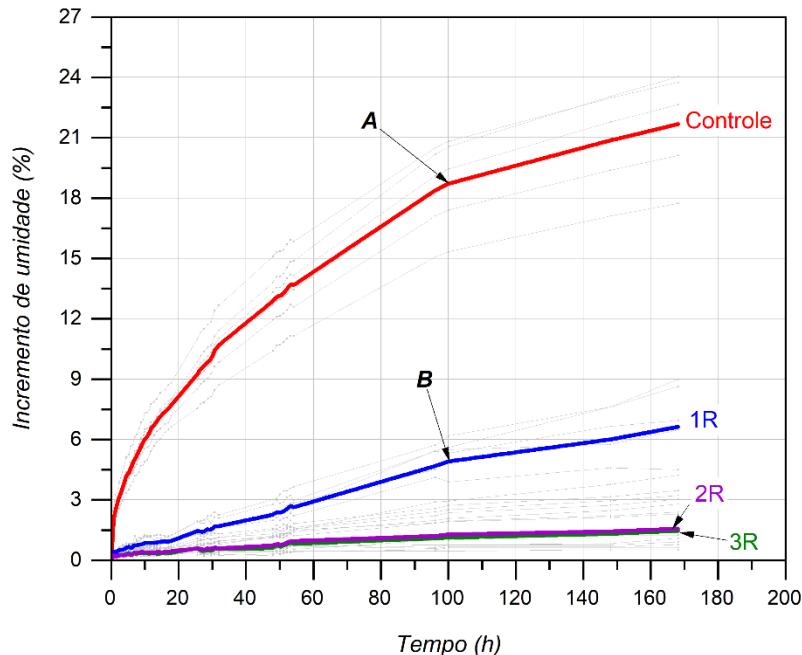
O menor coeficiente de absorção observado no grupo controle, em comparação às espécies de coníferas observadas na literatura, pode ser atribuído à estrutura anatômica mais complexa da madeira de maçaranduba, à sua menor porosidade e à maior presença de extrativos nos lúmens. Também, é possível inferir que as peças serradas utilizadas apresentam maior proporção de cerne adulto, o que contribui para o aumento da densidade e a redução da absorção capilar (Sandberg e Salim, 2012; Kumar *et al.*, 2016).

De forma geral, os resultados indicam que a matriz epóxi atuou como uma barreira física ao contato direto da água com a superfície da madeira. Isso é evidenciado pela redução significativa dos valores de A_w nos grupos com alguma camada de reforço, uma vez que o processo de difusão através da matriz epóxi é mais lento que através dos poros da madeira.

O aumento da dispersão dos dados, após um período de ensaio, também foi observado em Kordziel *et al.* (2020).

A Figura 4.9 ilustra o incremento da umidade ao longo do tempo, em horas. Para o grupo de controle, a madeira sem reforço, há uma mudança na inclinação na curva de incremento no instante em que a madeira atinge o ponto de saturação das fibras (ponto A da Figura 4.9). Esse comportamento, com tendência à estabilização da taxa de absorção, é característico de materiais com comportamento de difusão fickiano. Resultados semelhantes foram observados por Okoh (2014) para quatro espécies tropicais estudadas.

Figura 4.9 – Incremento de umidade ao longo do tempo de imersão em água.



Fonte: Autor.

O mesmo comportamento de mudança na inclinação da curva foi identificado no grupo com uma camada de reforço (1R), indicado como ponto B na Figura 4.9. Para esse grupo, a alteração na curva é atribuída à absorção de água pela matriz epóxi, a qual, ao entrar em contato com as fibras de vidro, reage com as hidroxilas do óxido de silício, enfraquecendo as ligações da matriz polimérica. Esse processo resulta na fissuração da matriz epóxi, permitindo o subsequente contato da água com a madeira (Won *et al.*, 2012). Com base nos resultados, infere-se que a mudança de inclinação marca o início da absorção de água pela madeira.

Por outro lado, os grupos 2R e 3R apresentaram comportamento praticamente constante ao longo de todo o ensaio, indicando que a aplicação de camadas adicionais de

reforço com matriz epóxi atua como uma barreira física eficiente à penetração de água. A partir desses resultados, pode-se concluir que a redundância na aplicação da matriz nos grupos 2R e 3R contribuiu significativamente para aumentar a estanqueidade das cavilhas de madeira.

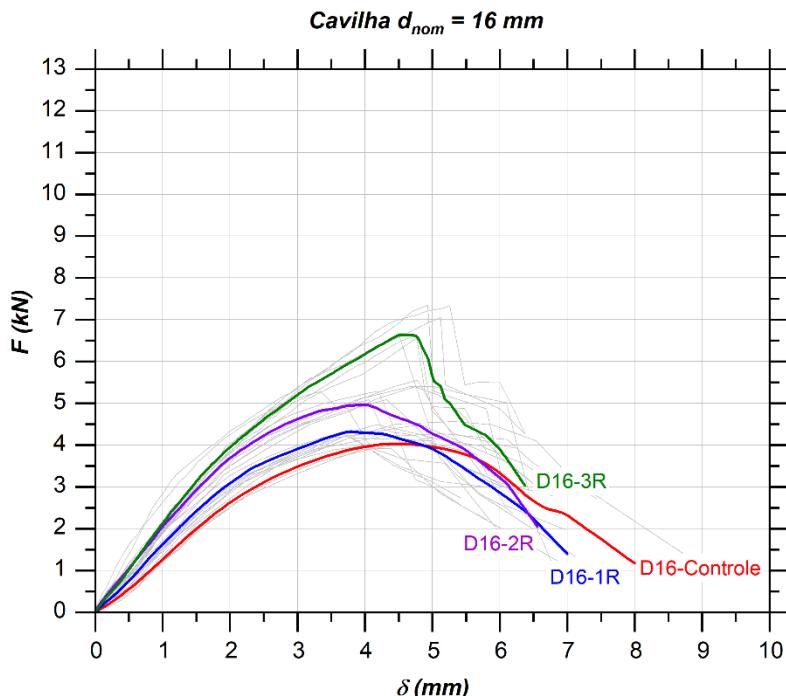
Considerando o objetivo deste trabalho, a aplicação de duas ou três camadas de reforço mostrou-se mais adequada, pois a menor absorção de água nas primeiras horas reduz o risco de comprometimento do processo de hidratação do concreto. Isso evita a formação de zonas de fragilidade na interface entre a cavilha e o concreto, promovendo maior desempenho estrutural da ligação.

4.2.2. Flexão da cavilha

4.2.2.1 Curva força–deslocamento

A Figura 4.10 a Figura 4.11 ilustram as curvas médias de força–deslocamento no meio do vão do ensaio de flexão das cavilhas com diâmetro nominal de 16 mm e 20 mm, respectivamente. O grupo controle corresponde às cavilhas sem reforço, enquanto os grupos 1R, 2R e 3R representam as cavilhas com uma, duas ou três camadas de reforço.

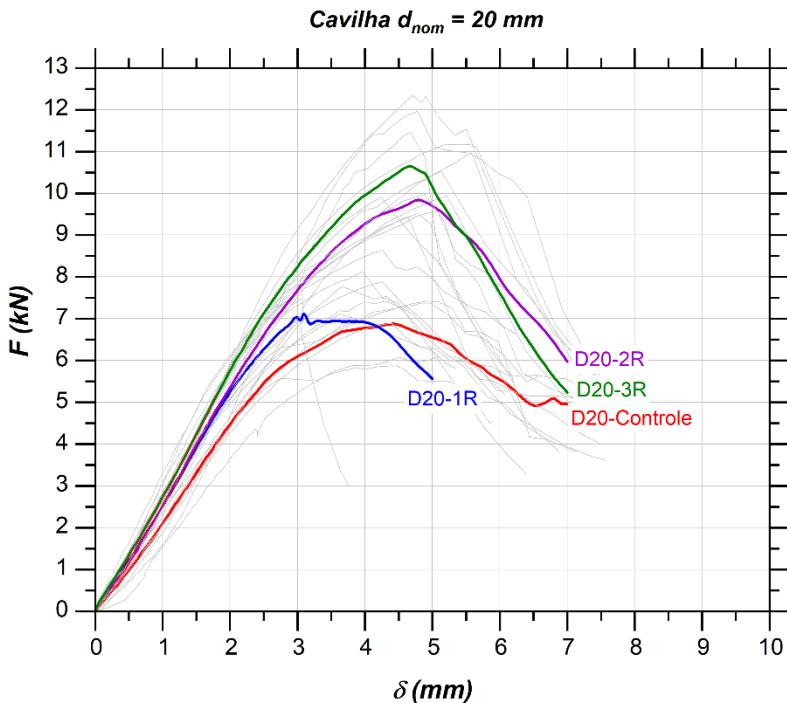
Figura 4.10 – Curva força–deslocamento para ensaio de flexão do pino: cavilhas com $d_{nom} = 16$ mm.



Legenda: d_{nom} = diâmetro nominal (ver Tabela 3.3, p. 85). F = força. δ = deslocamento no meio do vão.

Fonte: Autor.

Figura 4.11 – Curva força–deslocamento para ensaio de flexão do pino: cavilhas com $d_{nom} = 20$ mm.



Legenda: d_{nom} = diâmetro nominal (ver Tabela 3.3, p. 85). F = força. δ = deslocamento no meio do vão.

Fonte: Autor.

Conforme observa-se na Figura 4.10 e na Figura 4.11, os corpos de prova do grupo controle (sem camada de reforço) apresentaram um comportamento dividido em três fases principais, independentemente do diâmetro das cavilhas. A primeira fase corresponde ao trecho elástico, com deslocamentos médios de até 3 mm. Esse limite também foi observado por Khan *et al.* (2025) em ensaios com cavilhas de eucalipto (*E. grandis*, *E. regnans*, *E. obliqua* e *E. delegatensis*) com diâmetros de 16 mm e 19 mm. Após essa etapa, identificou-se uma fase com comportamento plástico, caracterizada por um pequeno ganho de resistência entre 3 mm e 4,5 mm de deslocamento. Por fim, ocorreu a ruptura dos corpos de prova, com perda da capacidade resistente e deslocamento crescente.

Teodorescu *et al.* (2020) relataram comportamento semelhante ao testar vinte cavilhas de maçaranduba com 12 mm de diâmetro, observando ruptura em torno de 4 mm de deslocamento. Contudo, os trabalhos divergem quanto ao comportamento pós-ruptura: enquanto Khan *et al.* (2025) e Tétreault *et al.* (2023) descrevem um comportamento frágil, Teodorescu *et al.* (2020) apontam certa ductilidade nas cavilhas ensaiadas.

Para as cavilhas com alguma camada de reforço, o comportamento das curvas força–deslocamento variou de acordo com o diâmetro testado. No caso das cavilhas com diâmetro

nominal de 16 mm, observou-se um aumento progressivo da rigidez na fase elástica, proporcional à quantidade de camadas de reforço aplicadas. As peças com uma e duas camadas de revestimento (grupos D16–1R e D16–2R) apresentaram um patamar plástico praticamente constante até o ponto de ruptura. Já as cavilhas com três camadas de reforço (grupo D16–3R) exibiram um aumento expressivo na resistência, porém com redução significativa da zona plástica, indicando um modo de ruptura predominantemente frágil.

Para as cavilhas com diâmetro nominal de 20 mm, verificou-se um aumento de rigidez, evidenciado pelo aumento da inclinação da reta elástica, independentemente da quantidade de camadas de reforço aplicadas. As cavilhas reforçadas com apenas uma camada de fibra de vidro (grupo D20–1R) apresentaram resistência média máxima semelhante à das cavilhas sem reforço (grupo D20–controle), em torno de 7 kN, embora tenham exibido menores deslocamentos.

Comparando-se com vigas circulares de madeira reforçadas com envolvimento de tecido de fibras de vidro e resina epóxi, Otoom *et al.* (2022) demonstraram que o uso de uma única camada de fibra não proporciona ganho significativo na resistência, sendo seu efeito mais perceptível no aumento da rigidez. De modo semelhante, Miotto (2009) observou que pequenas proporções de fibras em relação à seção transversal de madeira reduzem os deslocamentos em vigas retangulares, mas com impacto limitado nos valores de resistência. Ambos os estudos utilizaram madeiras de densidade aparente (ρ) próximas à 800 kg/m³ (*Bridelia exaltata* e *Lyptus*). Para espécies em que $\rho < 600$ kg/m³, o reforço com fibras tende a ser mais efetivo (Schobert *et al.*, 2015).

O comportamento das curvas força–deslocamento (Figura 4.10 e Figura 4.11) evidencia uma tendência à ruptura frágil nas cavilhas reforçadas, com menor presença de uma zona plástica. Esse comportamento está associado à contribuição do compósito de fibra de vidro e resina epóxi na rigidez do material, uma vez que esse tipo de reforço apresenta resposta predominantemente elástica e não dúctil, como demonstrado nos ensaios de tração direta (Figura 4.2, p. 119).

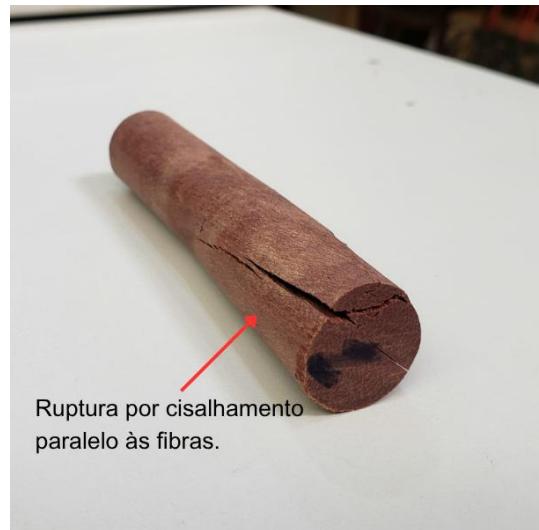
4.2.2.2 Modos de ruptura

Os modos de ruptura para o grupo controle são ilustrados na Figura 4.12. As cavilhas do grupo controle foram caracterizadas por três modos de ruptura principais: a ruptura por cisalhamento paralelo às fibras, a ruptura por tração das fibras inferiores e a ruptura combinada por tração e cisalhamento longitudinal.

Figura 4.12 – Modos de ruptura típicas das cavilhas do grupo controle, independente do diâmetro.



(a) cisalhamento paralelo às fibras.



(b) cisalhamento paralelo às fibras.



(c) tração das fibras inferiores.



(d) tração e cisalhamento longitudinal.



(e) formação de rótulas plásticas na ruptura.



(f) tração e cisalhamento longitudinal.

Fonte: Autor.

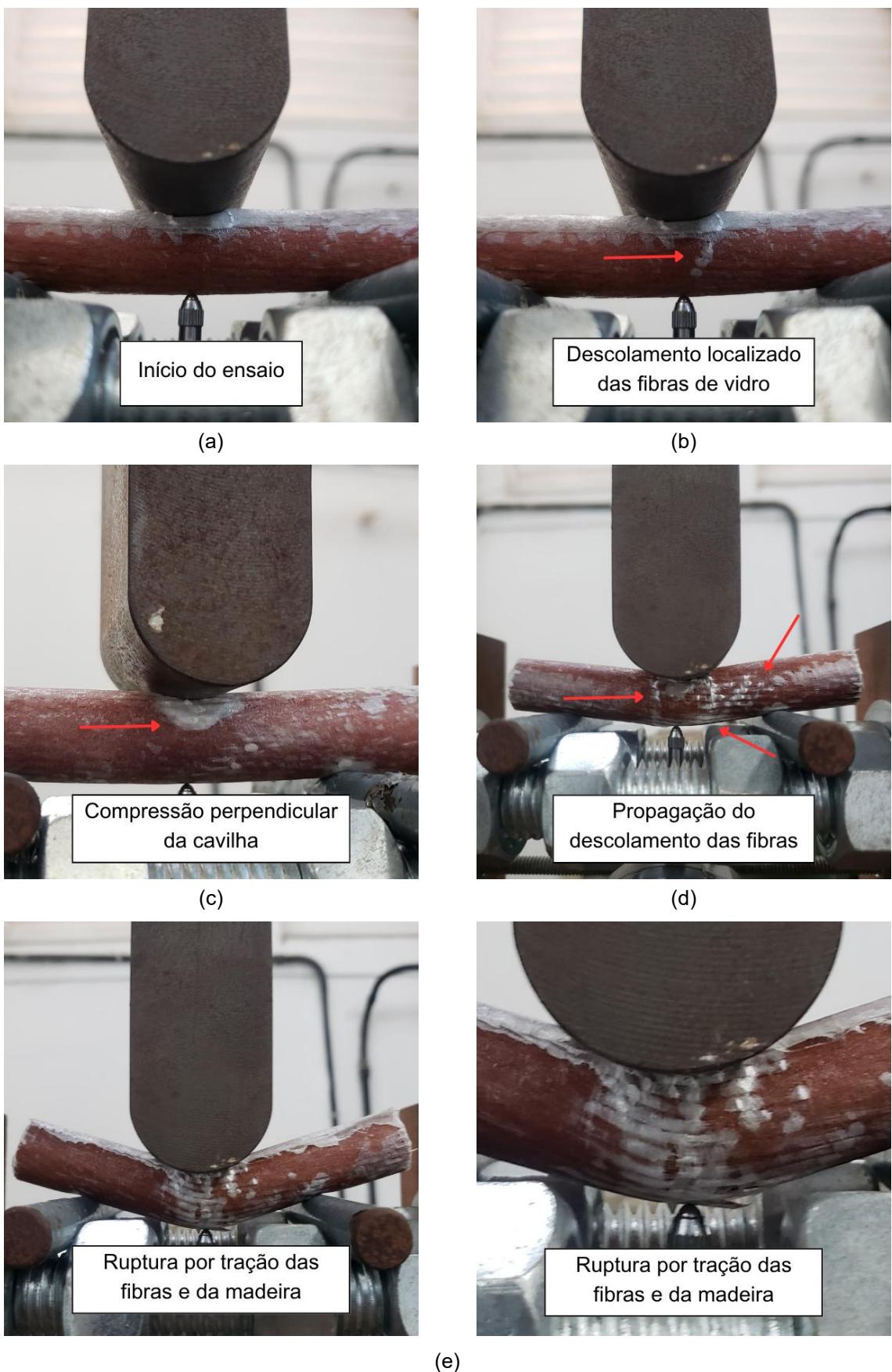
O modo de ruptura por cisalhamento longitudinal é característico do ensaio pelo “método da viga curta” (Thomson, 2010), uma vez que a influência do esforço cortante se torna significativa em menores vãos. Não foi identificada qualquer correlação entre o modo de ruptura e os valores de resistência à flexão dos pinos. Esse mesmo fenômeno foi relatado por outros autores da literatura ao estudarem cavilhas de madeiras densificadas e de bambu laminado (Mehra, 2020; Jockwer *et al.*, 2018; Namari *et al.*, 2021).

A ruptura por cisalhamento transversal tende a ser mais crítica em cavilhas produzidas com madeiras de coníferas ou com produtos laminados (Miller *et al.*, 2010; Jockwer *et al.*, 2018; Mehra, 2020), pois o cisalhamento entre os anéis de crescimento ou ao longo da linha de cola costuma apresentar menor resistência do que o cisalhamento paralelo às fibras. Neste trabalho, como foi utilizada madeira densa do grupo das folhosas na produção das cavilhas, os modos de ruptura se alternaram entre as três possibilidades apresentadas na Figura 4.12.

Para as cavilhas reforçadas, a sequência de ruptura seguiu as seguintes etapas: início do descolamento da fibra de vidro (Figura 4.13b); esmagamento da madeira por compressão perpendicular às fibras (Figura 4.13c); propagação do descolamento da fibra ao longo da cavilha (Figura 4.13d); por fim, a ruptura final por tração da fibra (Figura 4.13e). O descolamento inicial ocorreu acima da linha neutra da seção, o que pode estar relacionado ao encurtamento das fibras de madeira na região comprimida. A propagação do descolamento ao longo da lateral da cavilha indica uma limitação da resina epóxi em resistir aos esforços cisalhantes na interface entre os materiais.

Foi identificado que no instante da ruptura por tração, a fibra de vidro não estava aderente à superfície da madeira, demonstrando que o envolvimento manual, conjunto com o uso de resina epóxi, não foi eficiente aos esforços cisalhantes que ocorrem pela deformação da cavilha. Como alternativa para melhoria da aderência entre os materiais, sugerem-se técnicas de pressurização durante a aplicação da matriz. Vahedian *et al.* (2017) relataram que a aderência de resinas epóxi a tecidos de fibras tende a ser reduzida em madeiras com densidade superior a 800 kg/m³. Ainda que o modo de ruptura tenda a iniciar pelo descolamento localizado do tecido em relação à madeira, o reforço com fibra de vidro demonstrou ser eficaz no aumento da resistência e da rigidez das cavilhas submetidas à flexão.

Figura 4.13 – Observação de sequência típica das cavilhas submetidas à flexão até a ruptura.



Fonte: Autor.

4.2.2.3 Momento de plastificação efetivo ($M_{y,eff}$)

A Tabela 4.6 mostra os resultados do ensaio de flexão para as cavilhas de diâmetro nominal de 16 mm (D16) e 20 mm (D20), variando de acordo com a quantidade de reforço. A rigidez (k) foi determinada como a inclinação da reta de regressão linear para os pontos entre $0,1F_u$ e $0,5F_u$.

Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de flexão da cavilha.

D16				D20					
	C	1R	2R	3R	C	1R	2R	3R	
$d_{médio}$	(mm)	15,73	16,87	17,95	19,22	20,31	21,25	22,80	24,28
F_u	(kN)	4,03	4,32	4,96	6,63	6,87	6,94	9,84	10,65
F_y	(kN)	3,73	3,95	4,62	5,72	6,40	6,44	8,95	9,74
δ_u	(mm)	6,11	5,44	5,42	5,15	6,06	5,00	6,06	5,68
δ_y	(mm)	2,72	2,38	2,40	2,71	2,86	2,50	3,25	3,37
$M_{y,eff}$	(kN.mm)	21,99	24,99	31,07	41,25	48,73	51,33	76,55	88,68
k	(kN/mm)	1,43	1,69	1,96	2,12	2,30	2,61	2,84	2,94
D	(mm/mm)	2,25	2,28	2,26	1,90	2,12	2,00	1,86	1,69

Legenda: $d_{médio}$ = diâmetro médio; F_u = força última de ruptura; F_y = força de escoamento; δ_u = deslocamento último; δ_y = deslocamento de escoamento; $M_{y,eff}$ = momento de plastificação efetivo; $k_{0,1F_u \sim 0,5F_u}$ = rigidez na zona elástica; D = Ductilidade.

Fonte: Autor.

A partir dos resultados, pode-se notar que o processo de reforço contribuiu para uma redução entre 16% e 21% da ductilidade das cavilhas, sendo que os valores variaram entre 1,69 e 2,28. Jockwer *et al.* (2018) avaliaram cavilhas de bambu laminado colado (BLC), com diâmetro entre 8 mm e 20 mm, e encontraram valores de ductilidade entre 2,2 e 4,1. Mehra (2020) encontrou valores de ductilidade entre 1,2 e 1,7 para cavilhas densificadas de pinus (*Pinus sylvestris*) e de faia (*Fagus sylvatica*) com 10 mm de diâmetro. O processo de reforço, apesar de reduzir a capacidade de deformação pós-ruptura da cavilha, ainda resulta em valores próximos ao de outros materiais naturais comparados na bibliografia.

A Figura 4.14 ilustra a relação entre o momento de plastificação efetivo ($M_{y,eff}$) e o diâmetro (d) das cavilhas analisadas neste trabalho, em comparação com outros materiais referenciados na literatura. As curvas nas cores preta e azul representam, respectivamente, os parafusos fabricados com o aço de menor resistência disponível no mercado (classe S235)

e os parafusos atualmente comercializados no Brasil para uso específico em estruturas mistas de madeira e concreto (Classe 4.6). Ambas as curvas foram obtidas de forma analítica, com base na Equação (4.1), encontrada no Eurocode 5 (CEN, 2004b, p. 62).

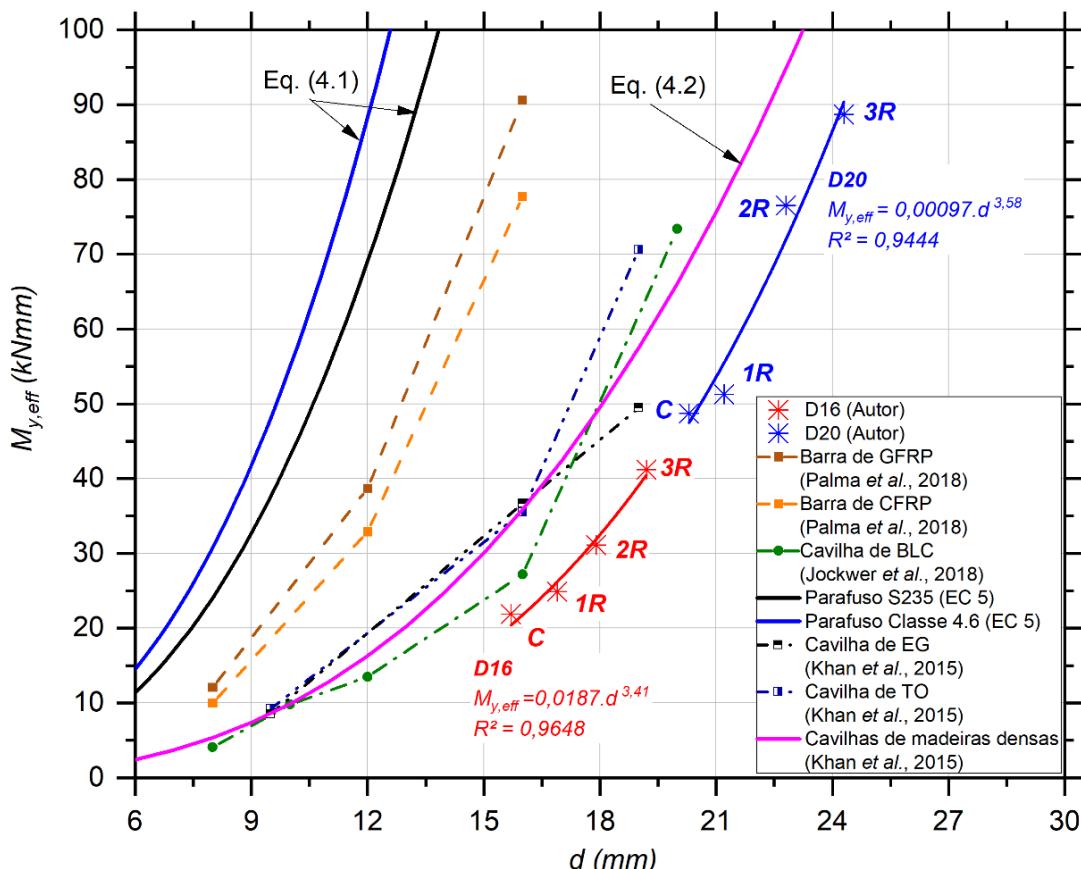
$$M_{y,eff} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad (4.1)$$

em que $f_{u,k}$ a força máxima característica, sendo $f_{u,k} = 0,36 \text{ kN/mm}^2$ para os parafusos S235 e $f_{u,k} = 0,46 \text{ kN/mm}^2$ para parafusos classes 4.6.

A curva em magenta foi proposta por Khan *et al.* (2025) para representar o valor de $M_{y,eff}$ para cavilhas de madeira densa e está expressa na Equação (4.2).

$$M_{y,eff} = 17,793d^{2,7441} (R^2 = 0,9062) \quad (4.2)$$

Figura 4.14 – Relação do momento de plastificação efetivo e o diâmetro.



Legenda: BLC = Bambu Laminado Colado. EG = *E. Grandis*. TO = *Tasmanian Oak* (*E. regnans*, *E. obliqua* e *E. delegatensis*)

Fonte: Autor.

Os valores do momento de plastificação efetivo ($M_{y,eff}$) para materiais naturais são significativamente inferiores aos obtidos com materiais metálicos e barras compostas por fibras de carbono (CFRP) e de vidro (GFRP) (Palma *et al.*, 2016). Além disso, os resultados deste trabalho indicam que as formulações presentes no Eurocode 5 não são adequadas para a estimativa de $M_{y,eff}$ em cavilhas de madeira, uma vez que essas equações foram desenvolvidas com base em conectores metálicos e não consideram as especificidades do comportamento da madeira.

A equação proposta por Khan *et al.* (2025) apresentou melhor compatibilidade com os dados obtidos nesta pesquisa, tanto em termos de magnitude quanto de tendência. Assim como observado neste estudo ($R^2 > 0,90$), os autores identificaram que a relação entre $M_{y,eff}$ e o diâmetro da cavilha segue um comportamento exponencial, sendo este o modelo mais adequado para representar o ajuste das curvas experimentais.

Para cavilhas de madeira densificada de pinus e faia com diâmetro de 10 mm, os valores de $M_{y,eff}$ ficaram entre 5,1 kN.mm e 11,8 kN.mm, conforme reportado por Mehra (2020) e Namari *et al.* (2021). Com base nas curvas de ajuste obtidas neste trabalho para os grupos D16 e D20, estimam-se valores de $M_{y,eff}$ entre 2,57 kN.mm e 3,80 kN.mm, respectivamente, para cavilhas com 10 mm de diâmetro.

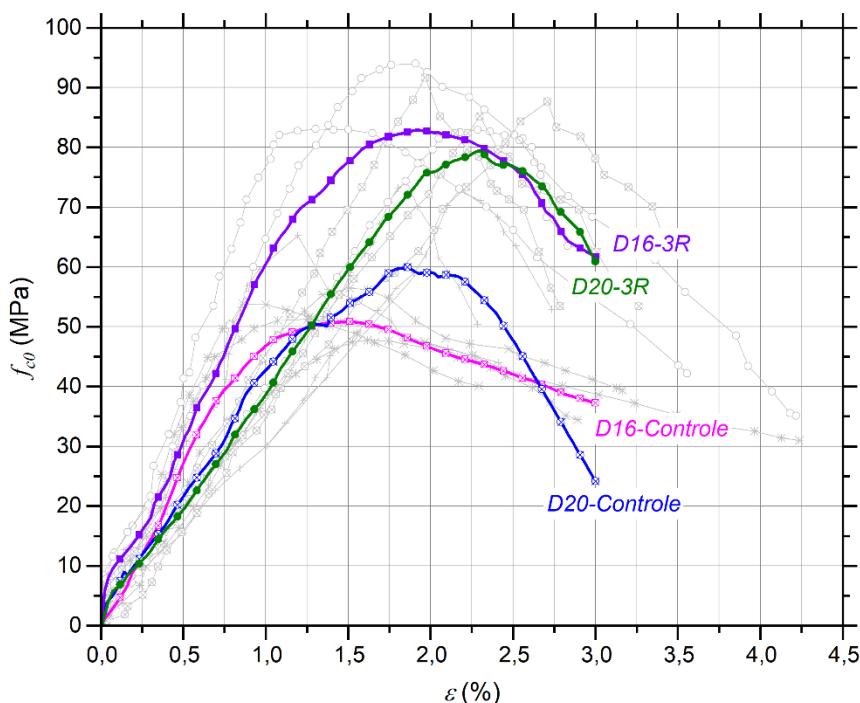
Ao comparar os resultados obtidos para as cavilhas reforçadas com GFRP com os valores reportados para cavilhas de BLC, observa-se que os valores deste trabalho são aproximadamente 55% inferiores aos encontrados por Jockwer *et al.* (2018), considerando cavilhas com os mesmos diâmetros. Fu *et al.* (2024) , por sua vez, ensaiaram cavilhas de *Fagus spp.* ($\rho = 711 \text{ kg/m}^3$) e 16 mm de diâmetro, obtendo um valor de $M_{y,eff}$ igual a 34,8 kN.mm. Esse resultado é significativamente superior ao observado nesta pesquisa para cavilhas sem reforço com o mesmo diâmetro.

Apesar de o reforço com fibra de vidro ter promovido um aumento de 84,7% nos valores de $M_{y,eff}$, a técnica de reforço se mostra menos eficiente em aumentar a propriedade do momento de plastificação que a técnica de densificação de madeiras de baixa densidade, conforme relatado na literatura. No entanto, como os valores obtidos ainda se situam dentro da faixa relatada por outros autores, o uso de cavilhas com reforço em fibra de vidro pode ser considerado viável para o dimensionamento de estruturas. Além disso, a técnica de reforço por envolvimento apresenta vantagens práticas, como maior simplicidade de execução em comparação com o processo de densificação.

4.2.3. Compressão axial da cavilha

A Figura 4.15 ilustra as curvas médias e individuais de tensão–deformação específica do ensaio de compressão axial das cavilhas sem reforço (controle) e com três camadas de reforço (3R) para os diâmetros nominais de 16 mm e 20 mm. A Tabela 4.7 traz os dados estatísticos de média e coeficiente de variação para cada grupo testado.

Figura 4.15 – Curvas tensão-deformação específica do ensaio de compressão axial das cavilhas.



Legenda: f_{c0} = tensão na compressão paralela às fibras. ε = deformação específica.

Fonte: Autor.

Tabela 4.7 – Resultados médios de resistência do ensaio de compressão axial da cavilha.

	D16-Controle	D16-3R	D20-Controle	D20-3R
\bar{x} (MPa)	50,69	82,92	59,97	79,46
DP	3,97	9,62	13,11	4,97
CV (%)	7,81	11,61	21,86	6,25

Legenda: \bar{x} = valor médio; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Autor.

Como se observa na Figura 4.15, a curva tensão–deformação das cavilhas submetidas à compressão axial apresenta um comportamento linear até atingir o valor máximo de resistência. Após esse ponto, alguns corpos de prova exibiram ruptura frágil, enquanto outros demonstraram um pequeno trecho de comportamento plástico. A inclinação da zona elástica foi semelhante entre os grupos controle e os reforçados com três camadas de tecido de fibra de vidro (3R), indicando que o reforço contribuiu apenas para o aumento da resistência máxima à compressão, sem alterar significativamente a rigidez das cavilhas. Esses comportamentos são consistentes com os resultados obtidos por Moerman *et al.* (2021), Khan *et al.* (2025) e O'Callaghan *et al.* (2022).

A resistência à compressão axial das cavilhas do grupo controle apresentou valores inferiores àqueles obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras (Tabela 4.2, p. 117), com reduções de aproximadamente 30% e 18% para os grupos de 16 mm e 20 mm de diâmetro, respectivamente. Essa diferença é atribuída principalmente à geometria do corpo de prova utilizado no ensaio, a qual provoca redistribuição das tensões. A comparação entre os métodos evidencia que a configuração do corpo de prova exerce influência no desempenho mecânico das cavilhas submetidas à compressão. Portanto, sugere-se que sejam aplicados fatores de correção ao utilizar valores de resistência à compressão paralela às fibras da madeira para fins de dimensionamento de cavilhas.

Nos grupos com cavilhas reforçadas com três camadas de tecido de fibras de vidro, observou-se um aumento expressivo da resistência à compressão axial em relação aos respectivos grupos controle. O acréscimo de resistência foi proporcionalmente maior nas cavilhas de menor diâmetro, indicando maior eficiência do confinamento. Esses resultados são compatíveis com os achados de O'Callaghan *et al.* (2022), que também identificaram ganhos significativos de resistência apenas a partir da aplicação de três camadas de GFRP em pilares de madeira do grupo SPF, atribuídos ao efeito de confinamento promovido pela matriz polimérica reforçada com fibras. Além disso, Najm *et al.* (2007) mostraram que o efeito de confinamento em peças circulares reduz a variabilidade dos dados, evidenciado pela diminuição do coeficiente de variação (CV) nos grupos reforçados.

A Figura 4.16 apresenta os modos de ruptura das cavilhas submetidas à compressão axial. Nas cavilhas sem reforço, a ruptura foi caracterizada pelo esmagamento localizado da madeira e deslizamento dos topes do corpo de prova. Para as cavilhas reforçadas, a falha teve início com o descolamento do adesivo na interface entre a madeira e as fibras de vidro, localizado próximo às extremidades dos corpos de prova. Esse fenômeno pode ser explicado pelas deformações transversais decorrentes do contato entre os corpos de prova e o prato da prensa, pontos onde ocorrem concentrações de tensões.

Considerando que, em conexões cavilhadas, as rupturas ocorrem predominantemente por flexão do pino ou por cisalhamento (Miller *et al.*, 2010; Vilguts *et al.*, 2024), raramente os pinos são solicitados até sua resistência máxima à compressão paralela às fibras. Dessa forma, o comportamento pós-ruptura e os modos de falha em compressão assumem papel secundário. Zhou *et al.* (2022) relataram que, para peças retangulares reforçadas com BFRP, há uma tendência de estabilização do ganho de resistência quando a proporção de reforço atinge cerca de 3%, limitando o aumento da resistência a aproximadamente 15%. No presente trabalho, com proporções de reforço em torno de 20% de tecido, o efeito de confinamento ainda foi claramente observado.

Figura 4.16 – Modo de ruptura das cavilhas com e sem reforço após ensaio de compressão axial da cavilha.



(a) esmagamento das extremidades.



(b) esmagamento das extremidades.



(c) esmagamento das extremidades.



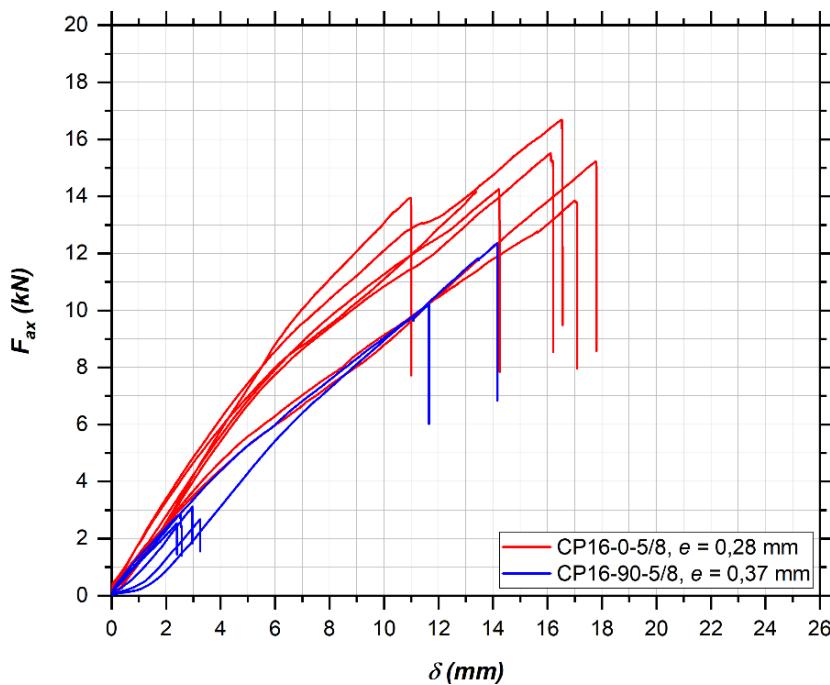
(d) esmagamento e deslizamento.

Fonte: Autor.

4.2.4. Arrancamento da cavilha

A Figura 4.17 e a Figura 4.18 apresentam as curvas força–deslocamento obtidas nos ensaios de arrancamento para os corpos de prova com furos de 5/8" e 3/4", respectivamente, os quais resultaram em diferentes espessuras de linha de cola (e). A Tabela 4.8 resume os resultados estatísticos obtidos para cada grupo avaliado. Todos os corpos de prova de um mesmo grupo apresentaram o mesmo modo de ruptura, sendo eles: por cisalhamento da interface bloco–adesivo (Figura 4.19) ou por tração do bloco (Figura 4.20).

Figura 4.17 – Curva força–deslocamento do ensaio de arrancamento do grupo CP16–5/8.



Fonte: Autor.

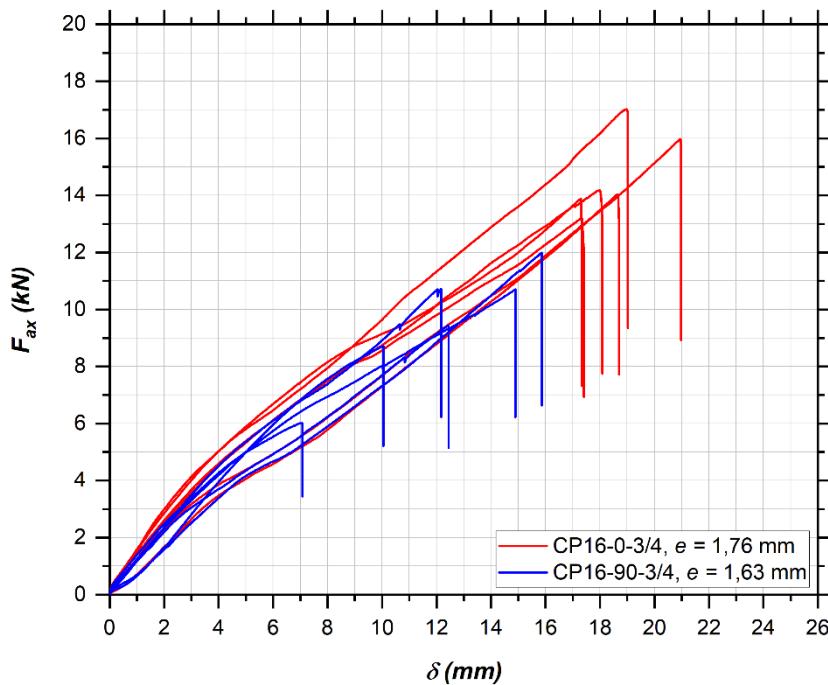
Tabela 4.8 – Resultados médios do ensaio de arrancamento e frequência dos modos de ruptura.

	$F_{ax,med}$ (kN)	d (mm)	l_p (mm)	$f_{ax,med}$ (MPa)	CV (%)	Modos de ruptura
D16-0-3/4	14,80	16,42	52,13	5,50	7	A
D16-90-3/4	5,62	16,62	54,49	1,98	78	B
D16-0-5/8	14,72	19,03	54,28	4,54	9	A
D16-90-5/8	9,60	19,08	53,74	2,98	21	B

Legenda: $F_{ax,med}$ = valor médio da força de arrancamento. d = diâmetro médio do furo. l_p = comprimento de ancoragem. $f_{ax,med}$ = valor médio da resistência ao arrancamento. CV = coeficiente de variação. Modos de ruptura: A = cisalhamento da interface bloco–adesivo (Figura 4.19). B = tração do bloco (Figura 4.20).

Fonte: Autor.

Figura 4.18 – Curva força–deslocamento do ensaio de arrancamento do grupo CP16–3/4.



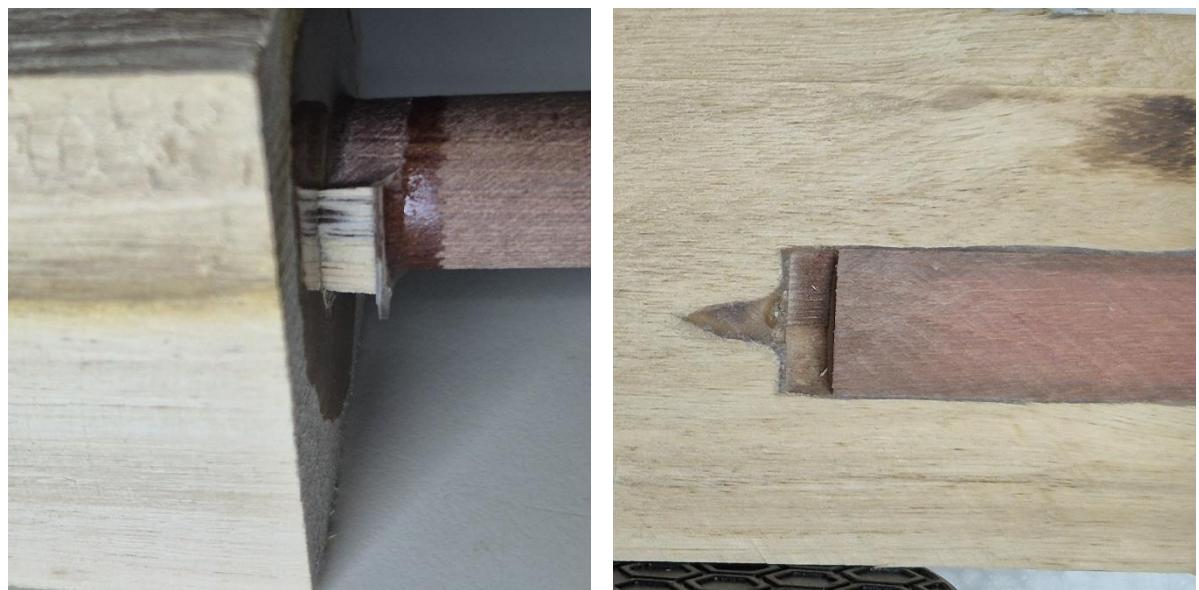
Fonte: Autor.

De maneira geral, todas as curvas apresentaram comportamento elástico-linear até o pico de ruptura, independentemente do ângulo de inserção em relação às fibras da madeira e da espessura da linha de cola. Esse comportamento uniforme entre os corpos de prova sugere a eficiência da resina epóxi utilizada neste trabalho. Além disso, os valores de deslocamento observados na amostragem foram superiores aos usualmente relatados na literatura para barras coladas com resina epóxi, os quais variam entre 1 mm e 5 mm (Stamatopoulos e Malo, 2015; Kaufmann *et al.*, 2018; Grunwald *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2023). Tal fenômeno pode estar relacionado a limitações do próprio ensaio na medição dos deslocamentos, considerando que o deslocamento registrado pela garra pode incluir o alongamento da cavilha ou do bloco, assim como o escorregamento da garra, resultando em valores superestimados de deslocamento.

Durante a fabricação dos corpos de prova, a elevada fluidez da resina epóxi ocasionou pequenas inclinações nas cavilhas após a cura, resultando em esforços excêntricos durante a realização do ensaio. Contudo, conforme demonstrado por Gonzales *et al.* (2016) e Dias *et al.* (2025), inclinações de até 4° não afetam significativamente os resultados de força de arrancamento, sendo esses efeitos considerados desprezíveis nesses estudos.

Com relação aos modos de ruptura, os corpos de prova com cavilhas inseridas paralelamente às fibras da madeira (CP16-0-5/8 e CP16-0-3/4) apresentaram ruptura por cisalhamento da interface bloco-adesivo, atribuída à falha do adesivo ou ao cisalhamento da madeira paralelo às fibras. Por outro lado, os corpos de prova com cavilhas inseridas perpendicularmente às fibras da madeira (CP16-90-5/8 e CP16-90-3/4) apresentaram ruptura por tração perpendicular às fibras do bloco. Em todos os casos, a falha observada é compatível com um comportamento frágil nas curvas força–deslocamento.

Figura 4.19 – Modo de ruptura tipo A: cisalhamento da interface bloco-adesivo.



(a) cisalhamento da interface bloco-adesivo.

(b) Deslizamento da cavilha.

Fonte: Autor.

Figura 4.20 – Modo de ruptura tipo B: tração normal às fibras da madeira do bloco.



Fonte: Autor.

Em termos de desempenho, os grupos CP16-0-5/8 e CP16-0-3/4 apresentaram valores médios de força máxima ($F_{ax,med}$) e resistência ao arrancamento ($f_{ax,med}$) aproximadamente 200% superiores aos grupos com cavilhas inseridas perpendicularmente às fibras. Esse resultado corrobora os dados encontrados na literatura, que indicam redução na resistência ao arrancamento à medida que aumenta o ângulo de inserção da cavilha em relação às fibras da madeira (Stamatopoulos e Malo, 2015).

Por outro lado, a variação na esbeltez (l_p/d), decorrente da diferença no diâmetro dos furos, não produziu diferenças estatisticamente significativas entre os grupos com mesma orientação das fibras. Xu *et al.* (2023) relataram que, para cavilhas densificadas inseridas em madeira lamelada colada de pinus, as mudanças na esbeltez na faixa de $8 < l_p/d < 12$ tiveram impacto pouco expressivo nos valores de $F_{ax,med}$.

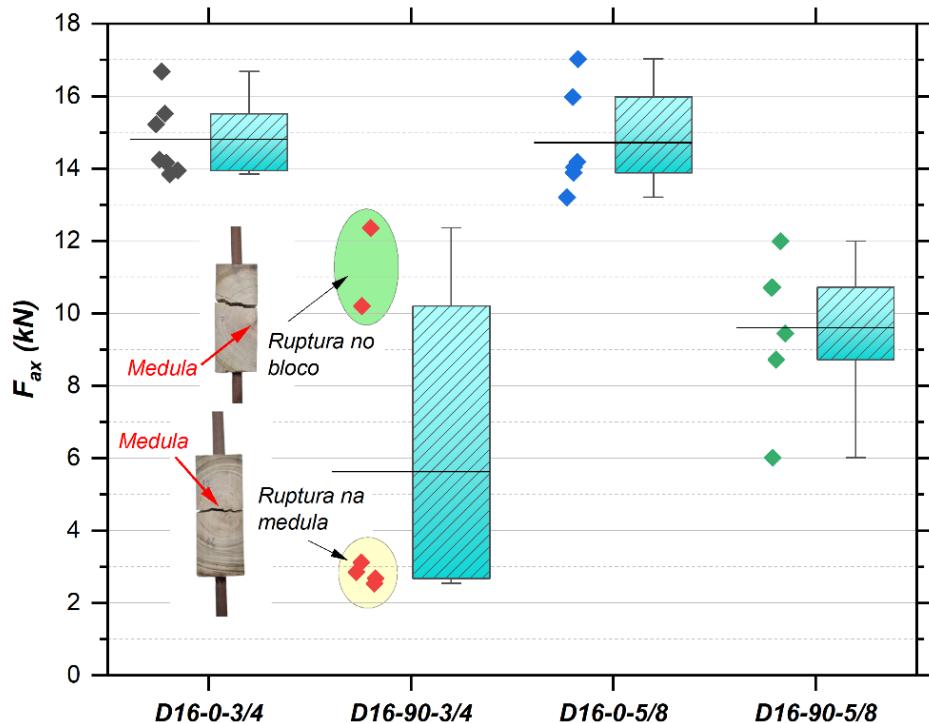
Para os grupos com cavilhas inseridas paralelamente às fibras (CP16-0-3/4 e CP16-0-5/8), o aumento na espessura da linha de cola não resultou em acréscimos significativos de $F_{ax,med}$. No entanto, nos grupos CP16-90-3/4 e CP16-90-5/8, observou-se um aumento médio de 70% na força máxima de arrancamento. Isto pode estar associado com a limitação de penetração do adesivo nos poros da madeira de maçaranduba, indicando que a espessura de linha de cola de 0,28 mm é suficiente para promover o máximo de aderência entre os materiais. Esse ganho pode ter sido influenciado por aspectos da preparação dos corpos de prova, uma vez que o grupo CP16-90-5/8 não apresentou presença evidente de medula nos blocos de madeira, enquanto o grupo CP16-90-3/4 apresentou rupturas em regiões com medula, o que conduziu a resultados médios inferiores.

Por fim, os grupos CP16-90-5/8 e CP16-90-3/4 apresentaram maior dispersão nos resultados, refletida em coeficientes de variação elevados. Esse comportamento está associado à presença de medula em alguns blocos de madeira do grupo CP16-90-3/4. Conforme ilustrado na Figura 4.21, os corpos de prova que romperam na região da medula, zona naturalmente mais frágil da madeira, apresentaram valores de resistência até 50% inferiores em comparação com aqueles cuja ruptura ocorreu fora dessa região. Nos corpos de prova do grupo CP16-90-5/8, não foi identificada a presença de medula (Figura 4.20), o que explica a menor variabilidade nos resultados. Tais resultados evidenciam a necessidade de classificação visual dos corpos de prova de maneira que exclua a presença de defeitos.

O ensaio de arrancamento evidenciou a efetividade da aderência das cavilhas de maçaranduba ao bloco de madeira, independentemente da espessura da linha de cola. Observou-se que menores espessuras de cola contribuíram para a redução de erros na inclinação da barra durante a colagem, tornando essa solução mais adequada para aplicação

em estruturas mistas. Além disso, considerando que o efeito do arrancamento é secundário nesse tipo de estrutura, os parâmetros avaliados se mostraram convenientes e compatíveis com os objetivos desta pesquisa.

Figura 4.21 – Distribuição dos dados do ensaio de arrancamento.



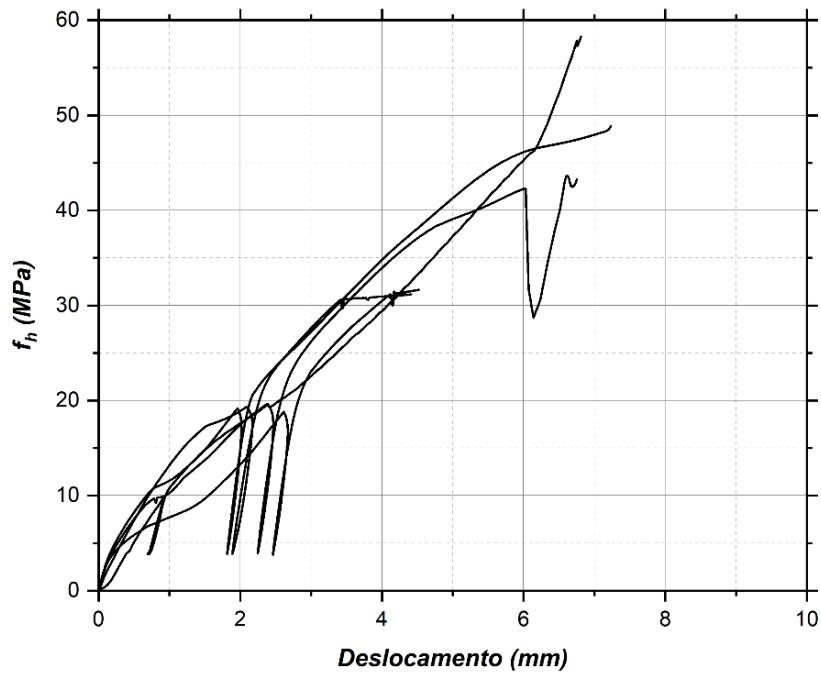
Legenda: A = corpos de prova em que a ruptura ocorreu no bloco. B = corpos de prova em que a ruptura ocorreu na medula.

Fonte: Autor.

4.2.5. Embutimento da cavilha

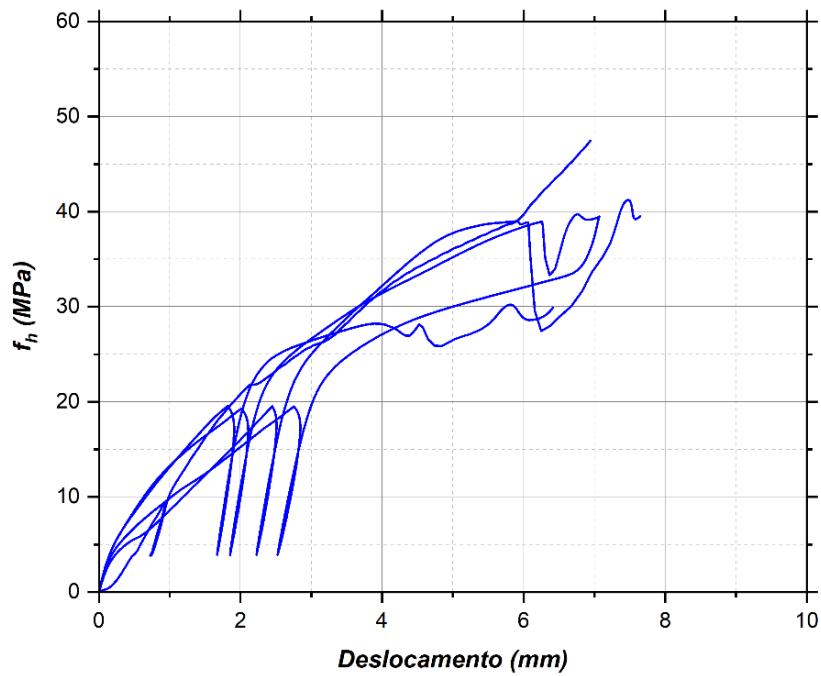
A Figura 4.22, Figura 4.23 e a Figura 4.24 apresentam as curvas individuais de resistência ao embutimento em função do deslocamento, obtidas para as cavilhas de maçaranduba com diâmetro nominal de 16 mm. Os ensaios foram realizados em peças de eucalipto com diferentes orientações das fibras da madeira em relação ao eixo de aplicação da força: paralela (C16-0), inclinada a 45° (C16-45) e perpendicular (C16-90). A Tabela 4.9 traz os resultados estatísticos do ensaio de embutimento para cada um dos grupos.

Figura 4.22 – Curva resistência ao embutimento–deslocamento para o grupo C16–0.



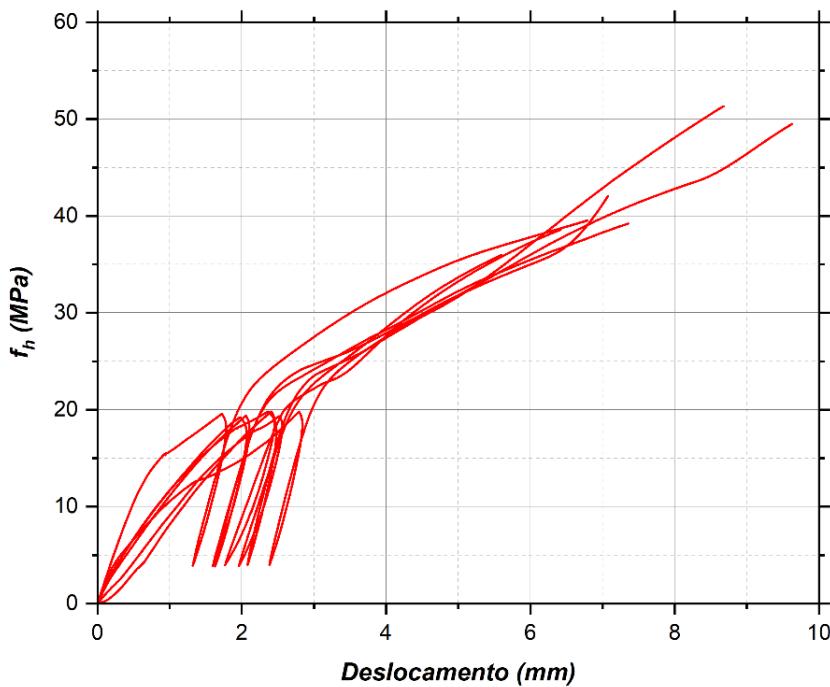
Fonte: Autor.

Figura 4.23 – Curva resistência ao embutimento–deslocamento para o grupo C16–45.



Fonte: Autor.

Figura 4.24 – Curva resistência ao embutimento–deslocamento para o grupo C16–90.



Fonte: Autor.

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de resistência ao embutimento.

	ρ_{bloco} (g/cm^3)	U_{bloco} (%)	$d_{cavilha}$ (mm)	$\rho_{cavilha}$ (g/cm^3)	$U_{cavilha}$ (g/cm^3)	$f_{h,5mm}$ (MPa)	$f_{h,0,05d}$ (MPa)
C16-0	0,747 [4%]	14,40 [1%]	15,82 [1%]	1,018 [5%]	13,14 [0,2%]	35,89 [13%]	33,01 [30%]
C16-45	0,756 [6%]	13,57 [5%]	15,58 [0,4%]	1,051 [2%]	12,87 [1%]	33,13 [14%]	27,22 [8%]
C16-90	0,821 [4%]	12,83 [2%]	15,69 [1%]	1,031 [2%]	13,06 [0,6%]	32,59 [4%]	25,04 [25%]

Legenda: $f_{h,5mm}$ = resistência média ao embutimento em deslocamento de 5 mm. $f_{h,0,05d}$ = resistência média ao embutimento capaz de criar um deslocamento de 5% o diâmetro do pino. ρ_i = densidade média do bloco de eucalipto ou da cavilha de maçaranduba. U_i = umidade média do bloco de eucalipto ou da cavilha de maçaranduba. $d_{cavilha}$ = diâmetro médio da cavilha. Entre colchetes estão os valores de coeficiente de variação.

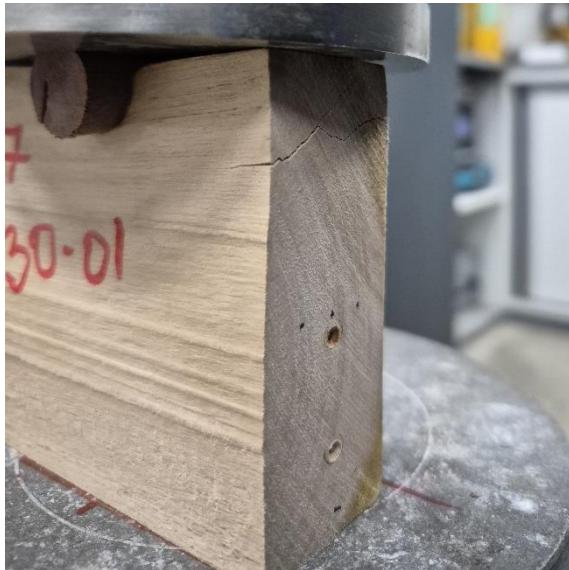
Fonte: Autor.

O comportamento da curva tensão–deslocamento obtida no ensaio de embutimento apresentou três etapas distintas. Na primeira fase, a cavilha resiste à maior parte da força aplicada, deformando isoladamente e atuando como um elemento dissipador da energia, transferindo gradualmente os esforços para o bloco de madeira, resultando em um comportamento mais rígido do que comparado se a cavilha fosse de um material metálico (Ceraldi *et al.*, 2017). A segunda fase tem início com o esmagamento da cavilha por compressão perpendicular, identificado pela mudança na inclinação da curva. Neste estágio, a força transferida para o bloco de madeira aumenta progressivamente, seguindo um comportamento linear proporcional à rigidez do bloco. A deformação do sistema passa a ser composta pela soma dos deslocamentos da cavilha e do bloco. Por fim, a terceira fase corresponde à ruptura do corpo de prova e à propagação da falha, cujo caráter pode ser frágil ou dúctil, a depender da orientação das fibras da madeira em relação à direção do carregamento.

Nos corpos de prova em que a força foi aplicada paralela (C16-0) e inclinada (C16-45) em relação às fibras da madeira, a ruptura ocorreu por cisalhamento paralelo às fibras, configurando um modo de falha frágil (Figura 4.25c e Figura 4.25d). Esse comportamento é identificado nas curvas força–deslocamento por quedas acentuadas da resistência. Já no grupo C16-90, observou-se a ruptura por tração perpendicular do bloco de madeira combinada com compressão perpendicular na região de contato com a cavilha. Esse tipo de ruptura combinada resulta em um comportamento dúctil. Além disso, quando o deslocamento atinge o valor correspondente ao raio da cavilha, o prato do equipamento entra em contato com o bloco de madeira, provocando um acréscimo de resistência após a ruptura. Schmidt e Daniels (1999) observaram comportamento semelhante ao ensaiar cavilhas de carvalho (*Quercus rubra*) embutidas em blocos de abeto de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*).

Fu *et al.* (2024), ao ensaiarem cavilhas de *Fagus* embutidas em LVL de madeira de larício (*Pinaceae* spp.), descreveram dois estágios principais nas curvas tensão–deslocamento, sendo a rigidez inicial superior à da etapa seguinte. Ceraldi *et al.* (2017) explicam que a rigidez da primeira fase é determinada pela capacidade do bloco de madeira em confinar a cavilha, enquanto a segunda fase reflete o somatório das deformações dos dois materiais. Ainda segundo os autores, a resistência ao embutimento está relacionada à razão entre as densidades da cavilha ($\rho_{cavilha}$) e do bloco de madeira (ρ_{bloco}). Quando essa razão é superior a 1 ($\rho_{cavilha} / \rho_{bloco} > 1$), observa-se uma tendência de redução da resistência ao embutimento. Por outro lado, Miller *et al.* (2010) recomendam que essa relação seja mantida maior que 1, a fim de evitar falhas por cisalhamento perpendicular na cavilha, embora possa resultar em menor resistência de embutimento.

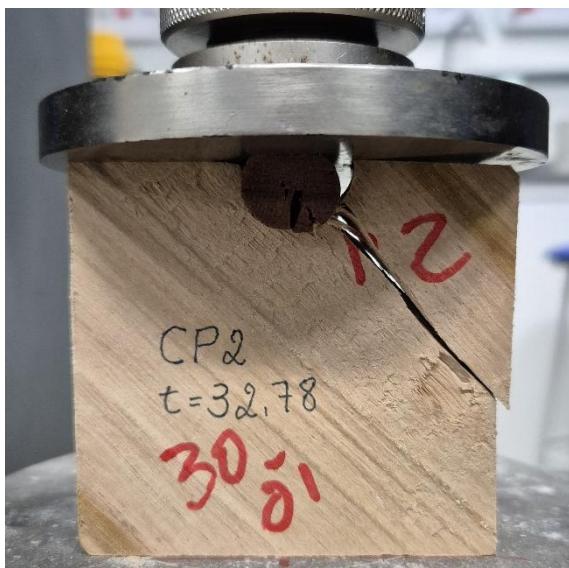
Figura 4.25 – Modos de ruptura típicos do ensaio de embutimento de cavilhas.



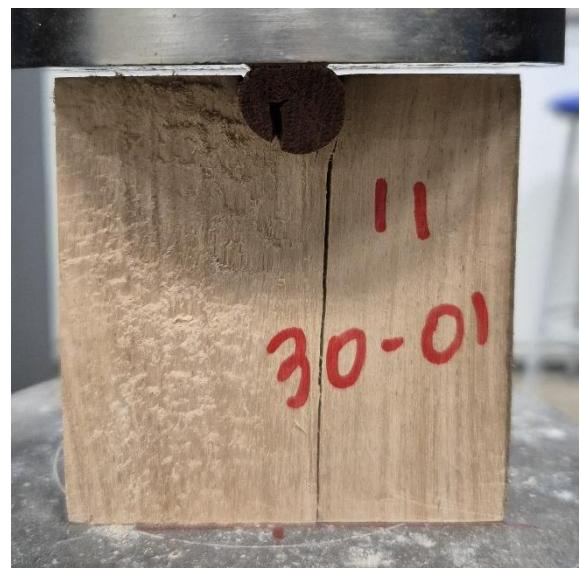
(a) tração normal às fibras em CP16-90.



(b) compressão normal às fibras em CP16-90.



(c) cisalhamento paralelo às fibras em CP16-45.



(d) cisalhamento paralelo às fibras em CP16-0.

Fonte: Autor.

A análise dos resultados obtidos neste estudo indicou que a determinação da resistência ao embutimento com base na resistência correspondente ao deslocamento de 5 mm ($f_{h,5mm}$) ou na resistência máxima ($f_{h,max}$) mostrou-se mais adequada do que o critério baseado na deformação residual igual a 5% do diâmetro da cavilha ($f_{h,0,05d}$). Como as curvas tensão–deslocamento apresentaram duas regiões lineares distintas, o método que utiliza a rigidez relativa entre $0,10f_h$ e $0,40f_h$, comumente empregado em ensaios com conectores metálicos, tornou-se impraticável, já que esses pontos ocorrem em trechos com rigidez diferenciada. A adoção de $f_{h,5mm}$ e $f_{h,max}$ como referência para a resistência resultou em uma série com

coeficientes de variação inferiores a 15%, validando a conveniência desse critério para análise de embutimento de cavilhas de madeira.

Considerando que o mecanismo de embutimento das cavilhas de madeira difere do observado em conectores metálicos (Miller *et al.*, 2010; Ceraldi *et al.*, 2017), a estimativa da resistência ao embutimento em função da densidade do bloco de madeira e do diâmetro do pino, presente na NBR 7190-1 (ABNT, 2022) e expressa na Equação (4.3), não é aplicável para cavilhas de madeira.

$$f_{h,0} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_{bloco} \quad (4.3)$$

Para os casos em que a força é inclinada em relação às fibras da madeira, a Equação (4.4) deve ser utilizada.

$$f_{h,\alpha} = \frac{f_{h,0}}{k_{90} \operatorname{sen}^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (4.4)$$

em que k_{90} fator de correção de acordo com o produto de madeira, $k_{90} = 0,90 + 0,015d$ para os casos de madeira de folhosas.

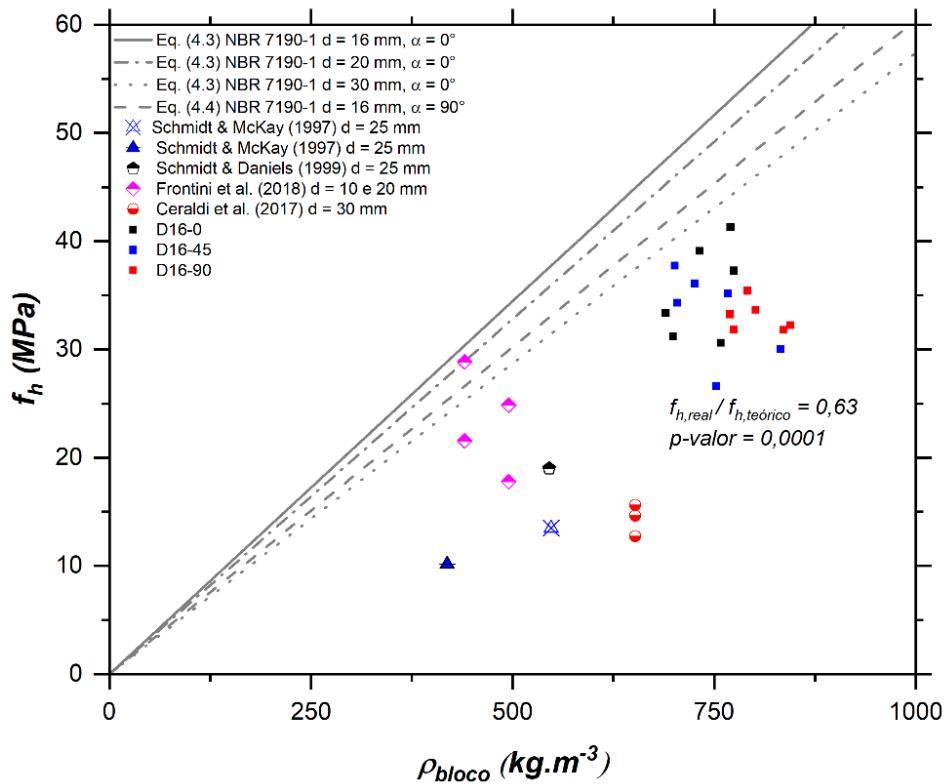
A equação presente da NBR 7190-1 (ABNT, 2022) não contempla a influência da interação entre as propriedades da cavilha e do bloco de madeira, Miller *et al.* (2010) sugeriram as Equações (4.5) e (4.6) para a determinação da resistência ao embutimento paralelo ($f_{h,0}$) e perpendicular às fibras ($f_{h,90}$).

$$f_{h,0} = 32,98\rho_{cavilha}^{1,32} \quad (4.5)$$

$$f_{h,90} = 33,78\rho_{cavilha}\sqrt{\rho_{bloco}} \quad (4.6)$$

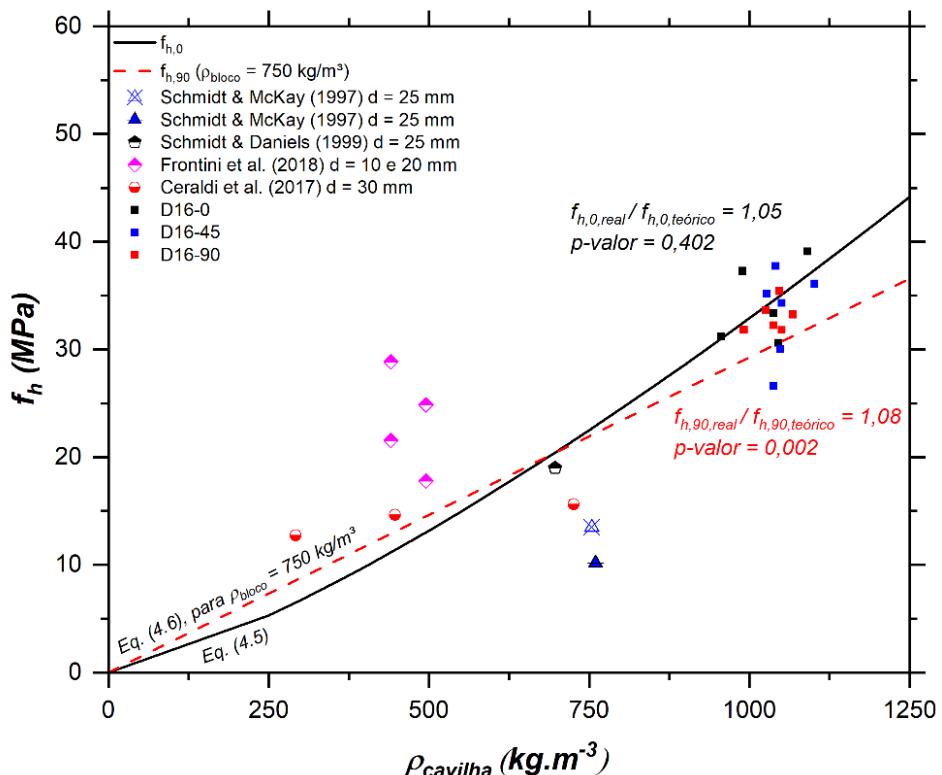
A Figura 4.26 e a Figura 4.27 ilustram os modelos de estimativa da resistência ao embutimento recomendados pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022) e por Miller *et al.* (2010), respectivamente. As figuras incluem os resultados obtidos nesta pesquisa, além de dados de outros trabalhos levantados na literatura. As retas da Equação (4.3) foram calculados para os diâmetros de 16 mm, 20 mm e 30 mm, com variação da densidade do bloco de madeira. Para a Equação (4.6), a reta foi traçada considerando-se $\rho_{bloco} = 750 \text{ kg/m}^3$, valor médio da densidade dos blocos de eucalipto utilizados nos ensaios. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados encontrados com o modelo de Miller *et al.* (2010) por meio do teste t de Student pareado para um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura 4.26 – Estimativa da resistência ao embutimento de acordo com o modelo da NBR 7190-1.



Fonte: Autor.

Figura 4.27 – Estimativa da resistência ao embutimento de acordo com o modelo de Miller *et al.* (2010).



Fonte: Autor.

De acordo com o ilustrado na Figura 4.26, o modelo da norma brasileira superestima significativamente a resistência ao embutimento, quando comparado com os resultados obtidos nesta pesquisa e com outros valores da literatura. Os dados experimentais foram, em média, 63% inferiores aos valores previstos pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022), indicando que esse modelo não é adequado para representar o comportamento de cavilhas de madeiras densas, como a maçananduba, embutidas em blocos de eucalipto.

Em contrapartida, o modelo proposto por Miller *et al.* (2010) apresentou melhor aderência aos dados experimentais, especialmente para os ensaios realizados com cavilhas solicitadas paralelamente às fibras da madeira. O teste t de *Student* pareado indicou ausência de diferença estatística significativa entre os resultados médios (p -valor > 0,05) dos dados experimentais e analíticos, validando o modelo para as condições deste estudo. Além disso, a diferença média entre os valores experimentais e os estimados foi de 5%, demonstrando boa concordância.

Por outro lado, essa mesma aderência não foi observada para os resultados com carregamento perpendicular às fibras. Nessa situação, o teste estatístico indicou diferença significativa (p -valor < 0,05), embora os valores experimentais tenham sido apenas 8% superiores aos estimados. Esse desvio, apesar de estatisticamente relevante, resulta em estimativas conservadoras, o que é desejável em favor da segurança. Assim, mesmo sem validação estatística, o modelo de Miller *et al.* (2010) ainda pode ser considerado apropriado para estimativas preliminares da resistência ao embutimento para essa condição.

Outro ponto relevante é que o modelo de Miller *et al.* (2010) não considera o diâmetro da cavilha como variável de entrada, sugerindo que esta não exerce influência significativa sobre a resistência ao embutimento. Essa premissa está alinhada com o conceito apresentado por Ceraldi *et al.* (2017), segundo o qual a resistência de cavilhas de madeira embutidas depende fundamentalmente da capacidade de confinamento proporcionada pelo bloco de madeira, e não do diâmetro do conector.

Portanto, os resultados sugerem que o modelo de Miller *et al.* (2010) apresenta maior adequação para estimar a resistência ao embutimento de cavilhas de madeira densa como a maçananduba, especialmente quando embutidas paralelamente às fibras do bloco de madeira, sendo mais realista que o modelo normativo atualmente adotado no Brasil.

4.3. LIGAÇÃO MADEIRA–CONCRETO

Os resultados estatísticos estão sintetizados na Tabela 4.10. O módulo de deslizamento de serviço foi considerado como a razão entre a variação de força e de deslizamento correspondente entre 10% e 40% da força máxima ($K_{40\%}$). Já o módulo de deslizamento último foi determinado da mesma forma, considerando o intervalo entre 40% e 80% da força máxima ($K_{80\%}$). Para corpos de prova com deslizamentos superiores à 15 mm, F_u foi determinado para quando $v_u = 15$ mm. Os valores são apresentados para cada par de conectores. Os resultados individuais estão listados no Apêndice A.

Tabela 4.10 – Resultados do *push-out test*.

		$K_{40\%}$ (kN/mm)	$K_{60\%}$ (kN/mm)	$K_{80\%}$ (kN/mm)	F_u (kN)	v_u (mm)
D16-X-C	Mín.–Máx.	3,52–21,30	2,71–16,32	2,66–22,90	26,29–71,79	3,82–15,00
	Média	17,29	16,32	14,00	49,40	5,57
	CV	19%	30%	39%	31%	24%
D16-X-R	Mín.–Máx.	11,67–32,28	10,43–34,65	5,37–25,84	30,91–5,15	5,15–11,83
	Média	22,03	21,42	16,94	52,37	7,45
	CV	44%	50%	50%	31%	35%
D16-PAR-C	Mín.–Máx.	6,48–17,89	5,45–19,52	4,99–20,12	56,22–85,08	3,22–15,00
	Média	11,69	12,04	11,24	70,21	10,18
	CV	38,86%	51,85%	56,96%	17,92%	48,57%
D16-PAR-R	Mín.–Máx.	11,41–19,00	8,68–16,77	6,10–9,22	57,76–79,89	10,54–13,63
	Média	14,62	11,72	7,86	67,61	12,85
	CV	23%	25%	14%	12%	9%
D20-X-C	Mín.–Máx.	10,56–22,14	10,97–21,89	10,63–19,69	35,96–63,97	3,58–8,01
	Média	18,93	16,44	14,83	49,75	5,63
	CV	22%	23%	25%	25%	27%
D20-X-R	Mín.–Máx.	20,29–38,46	15,51–36,29	12,90–30,25	14,79–86,34	3,03–10,39
	Média	29,82	26,16	21,91	74,42	7,03
	CV	22%	29%	29%	13%	26%
D20-PAR-C	Mín.–Máx.	9,07–26,37	6,67–23,50	5,60–19,86	74,61–99,32	13,33–15,00
	Média	14,88	12,15	10,25	86,71	14,33
	CV	46%	51%	49%	13%	4%
D20-PAR-R	Mín.–Máx.	16,89–26,35	12,67–18,78	8,90–12,55	90,58–121,28	15,00–15,00
	Média	20,47	15,11	10,98	108,77	15,00
	CV	17%	14%	10%	9%	0%

Legenda: $K_{40\%}$ = Módulo de deslizamento entre 10% e 40% da força última, igual ao módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}). $K_{60\%}$ = Módulo de deslizamento entre 10% e 60% da força última. $K_{80\%}$ = Módulo de deslizamento entre 10% e 80% da força máxima, igual ao módulo de deslizamento último (K_u). F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Autor.

A análise da Tabela 4.10 concentrou-se na comparação dos valores dos módulos de deslizamento de serviço ($K_{40\%}$), por ser a variável mais representativa para a avaliação da rigidez da ligação. As variáveis observadas foram: a orientação das cavilhas em relação às fibras da madeira, o diâmetro da cavilha e a presença de reforço de tecido de fibra de vidro (GFRP).

Em relação ao ângulo de inserção das cavilhas (90° ou 45°), observou-se que a inclinação das cavilhas resultou em maiores valores de rigidez das ligações. Para os grupos sem reforço, os valores médios de $K_{40\%}$ foram 49% maiores no grupo D16-X-C e 27% maiores no grupo D20-X-C, quando comparados, respectivamente, aos grupos D16-PAR-C e D20-PAR-C, com cavilhas inseridas perpendicularmente às fibras. Entre os grupos com reforço, a diferença também foi significativa: D16-X-R e D20-X-R apresentaram aumentos de 51% e 46% no módulo de deslizamento, respectivamente, em comparação com D16-PAR-R e D20-PAR-R.

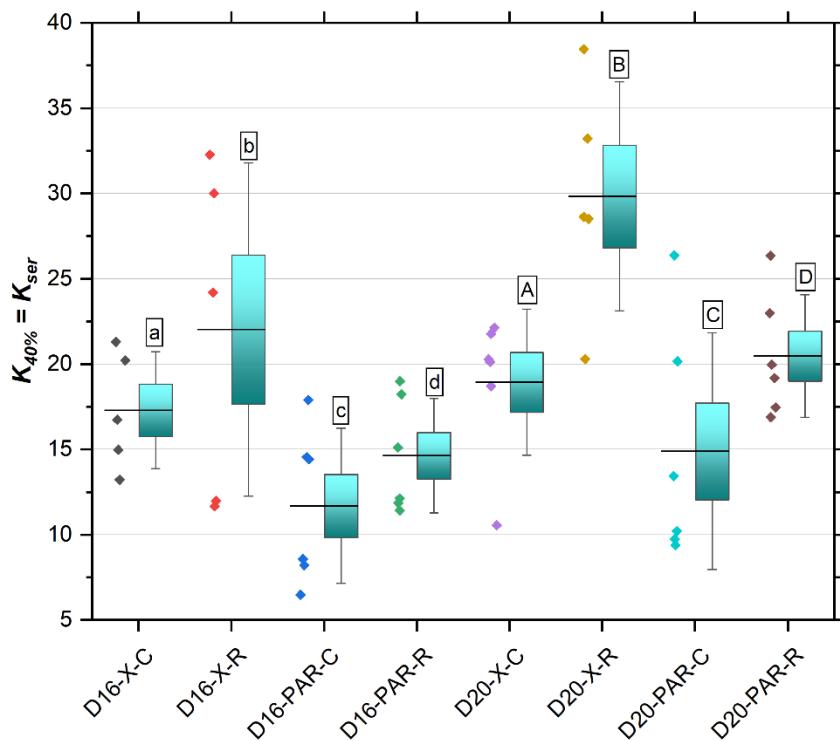
Os resultados deste trabalho estão em consonância com estudos da literatura, que indicam que pinos inclinados tendem a apresentar maior rigidez quando comparados com pinos perpendiculares (Martins *et al.*, 2016; Du *et al.*, 2019; Fernandes, 2022). Martins *et al.* (2016) encontraram uma relação de 55% entre parafusos sextavados inclinados e paralelos. Já Du *et al.* (2019) encontraram um aumento de 76% quando compararam o efeito da inclinação em parafusos autoatarraxantes. Por fim, Fernandes (2022) realizou um trabalho com barras nervuradas inseridas em MLC e encontrou uma relação de 2,54 entre as barras inclinadas em relação às barras em 90°.

No que diz respeito ao diâmetro das cavilhas, observou-se que o aumento de 16 mm para 20 mm teve efeito positivo na rigidez das ligações. Para os grupos sem reforço, os módulos de deslizamento dos grupos D20-PAR-C e D20-X-C foram, respectivamente, 91% e 27% superiores aos dos grupos D16-PAR-C e D16-X-C. Com a presença de reforço, os grupos D20-PAR-R e D20-X-R superaram seus equivalentes de 16 mm (D16-PAR-R e D16-X-R) em 35% e 104%, respectivamente.

A presença de três camadas de tecido de fibra de vidro (GFRP) também contribuiu para o aumento da rigidez. Para cavilhas com 20 mm de diâmetro, o reforço promoveu um acréscimo entre 26% e 58% no módulo de deslizamento de serviço. Para as cavilhas com 16 mm, o aumento foi de 25% a 38%. Esses dados demonstram que a aplicação do reforço teve efeito positivo na rigidez das ligações, independentemente do diâmetro da cavilha ou da orientação de inserção.

De forma geral, os resultados confirmam que o reforço com tecido de GFRP contribui para o aumento da rigidez das ligações madeira-concreto, ao melhorar as propriedades mecânicas das cavilhas. Além disso, constatou-se que a rigidez da ligação aumenta com o diâmetro da cavilha e é significativamente maior quando as cavilhas são inseridas inclinadas em relação às fibras da madeira. As Figura 4.28 ilustra por meio de gráfico *boxplot* as comparações discutidas nos parágrafos anteriores. A comparação das médias foi realizada por meio do teste t de *Student* para amostras independentes para $\alpha = 0,05$.

Figura 4.28 – *Boxplot* de dados de módulo de deslizamento por série.



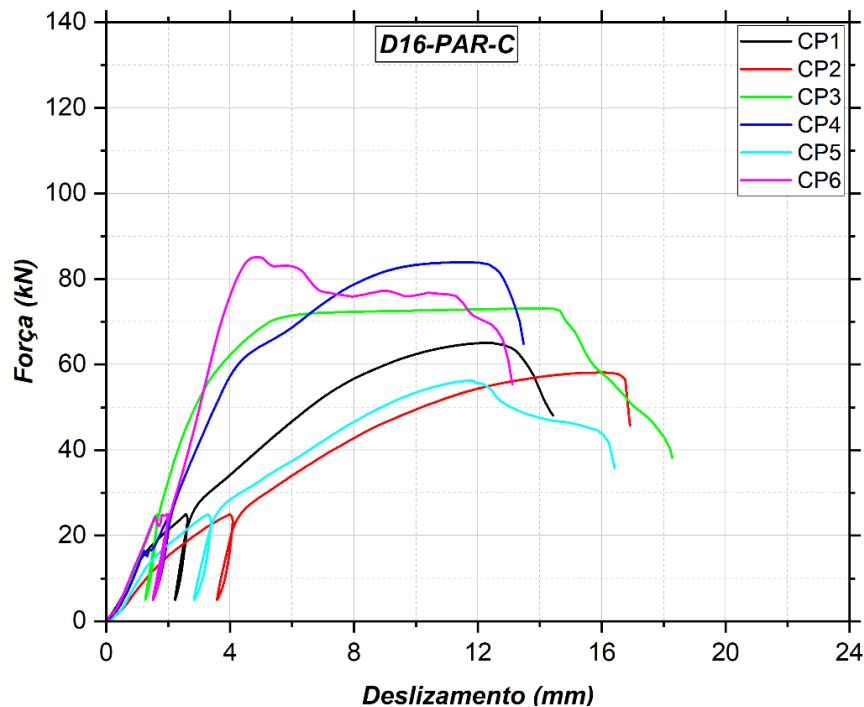
As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Fonte: Autor.

4.3.1. Curvas força–deslizamento

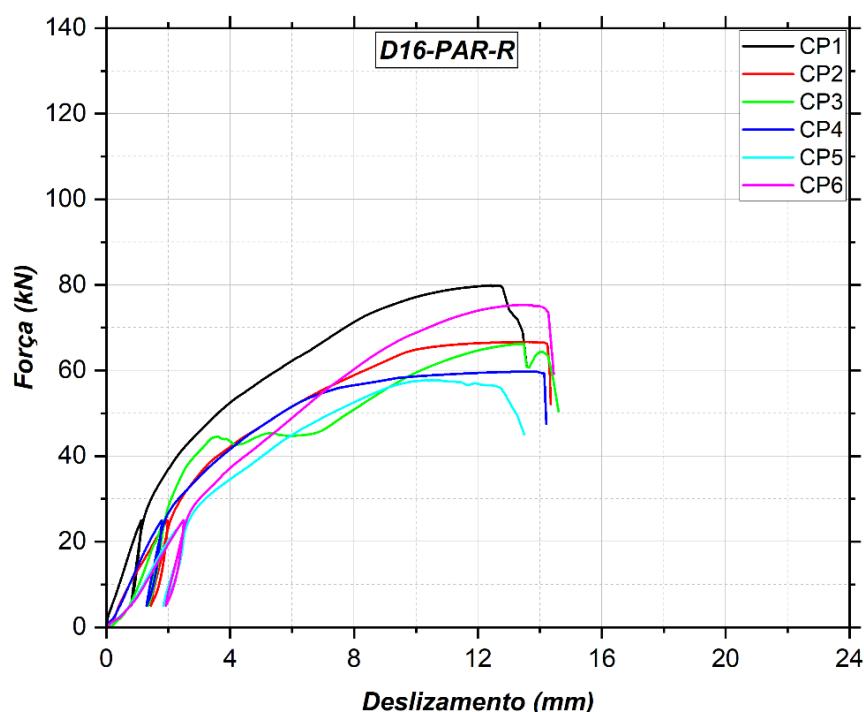
As Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32 ilustram as curvas individuais para cavilhas com diâmetro nominal de 16 mm, inseridas perpendicularmente e inclinadas em relação às fibras da madeira, nas condições sem reforço e com reforço composto por três camadas de tecido de GFRP. Da mesma forma, as Figura 4.33, Figura 4.34, Figura 4.35 e Figura 4.36 exibem as curvas individuais do ensaio para cavilhas com diâmetro nominal de 20 mm, também inseridas perpendicular e inclinadamente à madeira, nas mesmas condições de reforço.

Figura 4.29 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 16 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 90°.



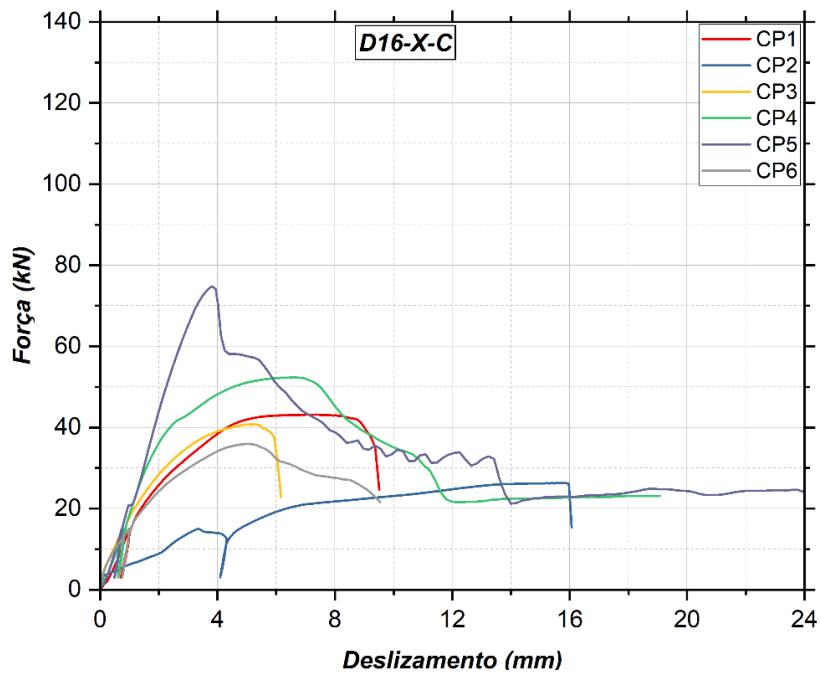
Fonte: Autor.

Figura 4.30 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 16 mm de diâmetro, reforçadas e posicionadas em 90°.



Fonte: Autor.

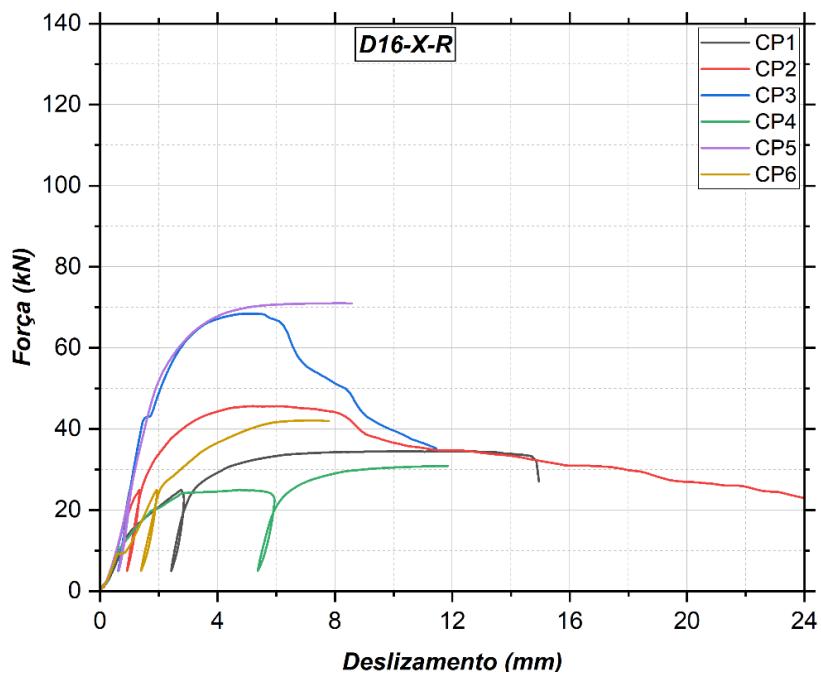
Figura 4.31 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 16 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 45°.



Nota: CP2 excluído da análise estatística por erro na execução do ensaio.

Fonte: Autor.

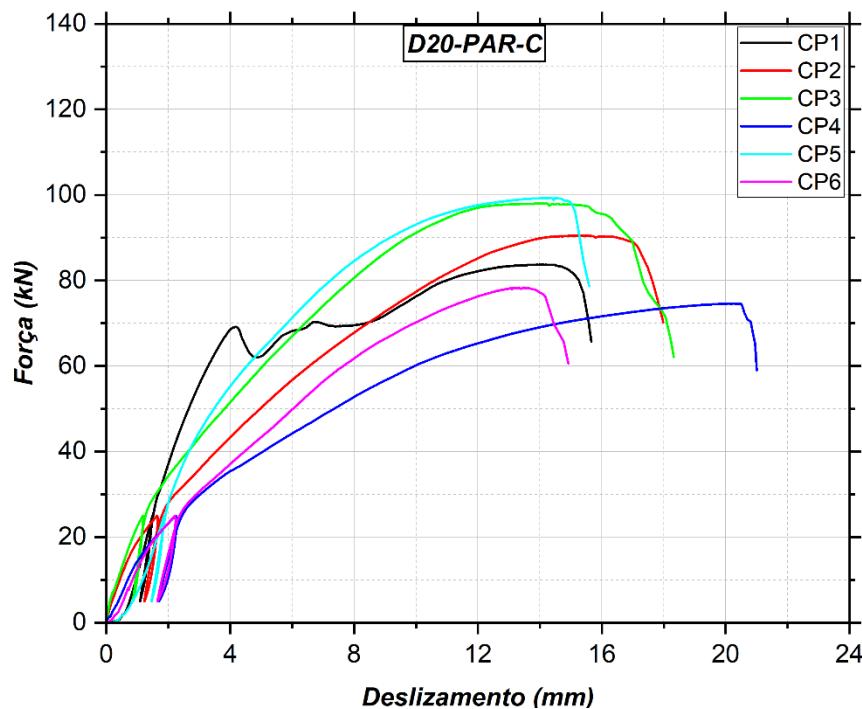
Figura 4.32 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 16 mm de diâmetro, reforçadas e posicionadas em 45°.



Nota: CP4 excluído da análise estatística por erro na fabricação do corpo de prova.

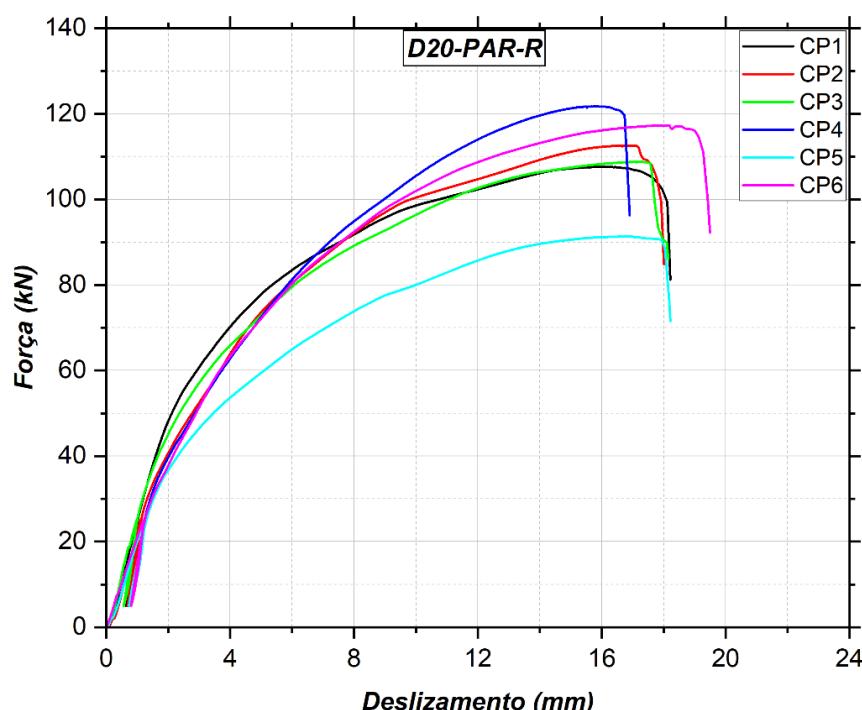
Fonte: Autor.

Figura 4.33 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 20 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 90°.



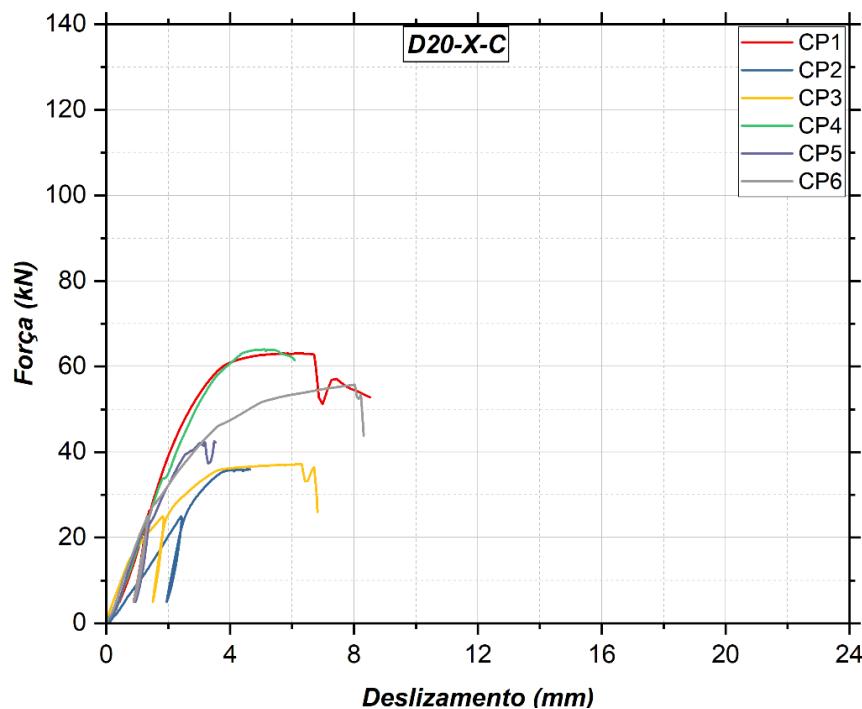
Fonte: Autor.

Figura 4.34 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 20 mm de diâmetro, reforçadas e posicionadas em 90°.



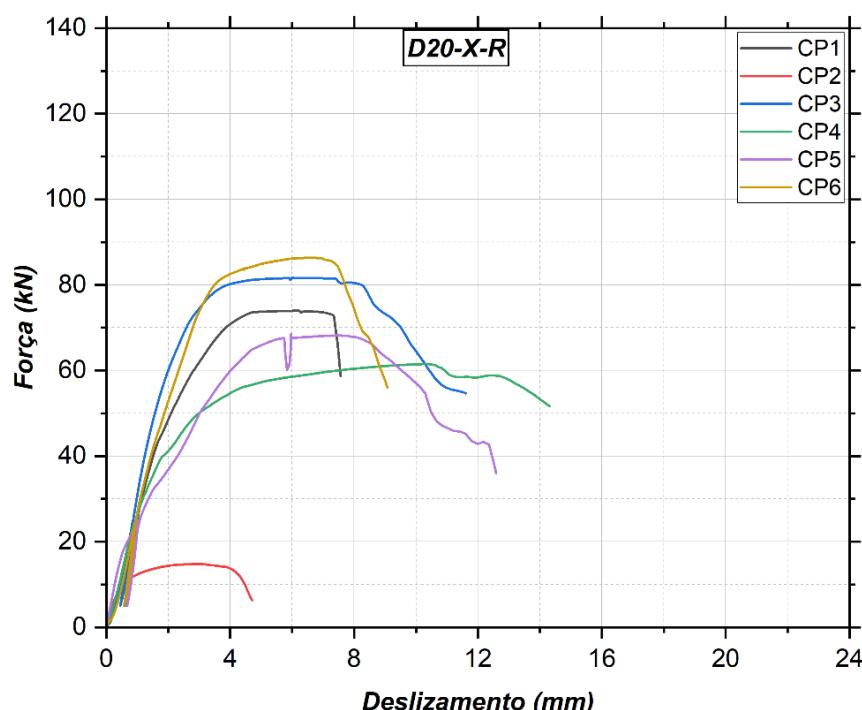
Fonte: Autor.

Figura 4.35 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 20 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 45°.



Fonte: Autor.

Figura 4.36 – Curva força–deslocamento para o ensaio de *push-out test* para os corpos de prova com cavilhas de 20 mm de diâmetro, sem reforço e posicionadas em 45°.



Nota: CP2 excluído da análise estatística por erro na fabricação do corpo de prova.

Fonte: Autor.

As séries com cavilhas posicionadas perpendicularmente às fibras da madeira (D16-PAR-C, D16-PAR-R, D20-PAR-C e D20-PAR-R) apresentaram comportamentos distintos em função do diâmetro e da presença de reforço. Nos grupos com cavilhas de 16 mm sem reforço (D16-PAR-C), observou-se um comportamento linear até a ruptura, com pouco ou nenhum trecho plástico. Este comportamento também foi relatado por Souza (1997) ao ensaiar cavilhas de madeira D60 com 31,6 mm de diâmetro. Algumas curvas apresentaram flutuações iniciais, fenômeno associado à acomodação das cavilhas. Já nas cavilhas de 20 mm sem reforço (D20-PAR-C), parte dos corpos de prova apresentou um pequeno trecho plástico anterior à ruptura, justificado pela maior área para distribuição dos esforços.

A aplicação de reforço com três camadas de tecido de fibra de vidro (GFRP) nas cavilhas de 16 mm (D16-PAR-R) não promoveu incremento da força máxima, mas contribuiu para o desenvolvimento de um trecho plástico mais definido, aumentando a ductilidade do sistema. Nas cavilhas de 20 mm (D20-PAR-R), o reforço resultou em um incremento médio de 25% na resistência última e em uma transição mais gradual entre os estágios elástico e plástico. As curvas dessas séries apresentaram maior uniformidade e menor dispersão dos resultados.

Nas séries com cavilhas inclinadas a 45° em relação às fibras da madeira (D16-X-C, D16-X-R, D20-X-C e D20-X-R), as curvas apresentaram um trecho linear seguido de um patamar plástico quase constante até a ruptura. Esse comportamento foi mais evidente nos grupos sem reforço (D16-X-C e D20-X-C) e intensificado nas séries com reforço (D16-X-R e D20-X-R), que exibiram maior extensão da região plástica.

A baixa aderência entre as cavilhas e o concreto fez com que, durante a solicitação, a cavilha submetida à flexotração deslizasse, concentrando os esforços na cavilha em flexocompressão. O trecho linear das curvas correspondeu, principalmente, à resistência da cavilha comprimida, enquanto o trecho plástico refletiu o esforço residual da cavilha comprimida contribuído pela parcela de flexão da cavilha tracionada. A ruptura da maioria dos corpos de prova com cavilhas inclinadas ocorreu com o deslizamento máximo do sistema, caracterizado por escoamento prolongado sem perda abrupta de resistência.

Essas observações confirmaram que a forma de inserção das cavilhas, o diâmetro e a presença de reforço influenciaram diretamente o desempenho mecânico das ligações mistas. As cavilhas inclinadas apresentaram maior capacidade de deformação antes da falha, enquanto o reforço com GFRP aumentou a ductilidade do sistema, com efeito mais expressivo nas cavilhas de maior diâmetro.

A Tabela 4.11 traz os valores de módulo de deslizamento (K_{ser}) para diversos materiais utilizados como conectores de cisalhamento em estruturas mistas. Os valores médios

encontrados para este trabalho são compatíveis aos encontrados na literatura, podendo ser comparado às soluções com parafusos de cabeça sextavada (Du *et al.*, 2019) e materiais inovadores como pinos de compósitos de concreto reforçado com fibras e chapas de compensado (Auclair *et al.*, 2016; Daňková *et al.*, 2019; Shan *et al.*, 2022). Ademais, o resultado deste trabalho ainda é inferior quando comparado as soluções feitas com conectores metálicos (Miotto e Dias, 2015).

Tabela 4.11 – Valores de módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) para diversos tipos de conectores.

Ref.	Conector	K_{ser} (kN/mm)
[1]	D16–X–C	17,29
	D16–X–R	22,03
	D16–PAR–C	11,69
	D16–PAR–R	14,62
	D20–X–C	18,93
	D20–X–R	29,82
	D20–PAR–C	14,88
	D20–PAR–R	20,47
[2]	Ganchos de barras de nervurada inseridos inclinados	142,90
[3]	Pino de CUAD	17,95
	Pino compósito de CUAD reforçado com barra roscada Ø5 mm	20,20
	Pino compósito de CUAD reforçado com barra roscada Ø10,2 mm	31,60
[4]	Dois parafusos autoatarraxantes de Ø8 mm em 45°	52,10
[5]	Parafuso de cabeça sextavada inclinados Ø10 mm	14,80
	Parafuso de cabeça sextavada inclinados Ø14 mm	20,50
[6]	Chapas de compensado de madeira de faia coladas em MLC	66,12
[7]	Compósito de CUAD reforçado com fibras Ø19 mm	27,90
[8]	Barra nervurada em 90° em relação às fibras da madeira.	29,70
[9]	Chapa metálica perfurada	148,21

Fonte: Feito pelo [1] Autor com referências de: [2] Miotto e Dias (2015); [3] Auclair *et al.* (2016); [4] Marchi *et al.* (2017); [5] Du *et al.* (2019); [6] Daňková *et al.* (2019); [7] Shan *et al.* (2022); [9] Fernandes (2022).

4.3.2. Modos de ruptura

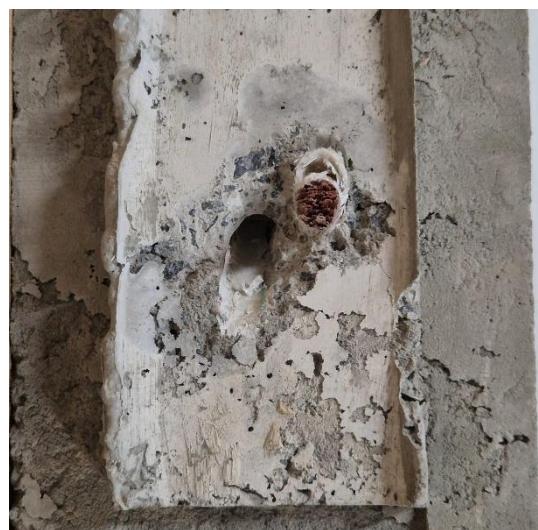
Os modos de ruptura identificados no *push-out test* são apresentados na Figura 4.37. Os modos de ruptura foram iguais para todos os corpos de cada prova de cada grupo. O grupo

com cavilhas de diâmetro igual a 16 mm, inseridos com inclinação de 45°, apresentou um pequeno deslocamento do concreto na região do furo devido à flexão da cavilha solicitada à flexotração, causando folga, possibilitando o escorregamento da cavilha. Também, cabe ressaltar que foi identificada baixa aderência na interface entre a cavilha e concreto. No mesmo grupo, a cavilha solicitada à flexocompressão tendeu a romper por cisalhamento perpendicular. Para o grupo das cavilhas inclinadas com diâmetro de 20 mm não houve corte das cavilhas, porém houve flexão da cavilha com formação de rótulas plásticas.

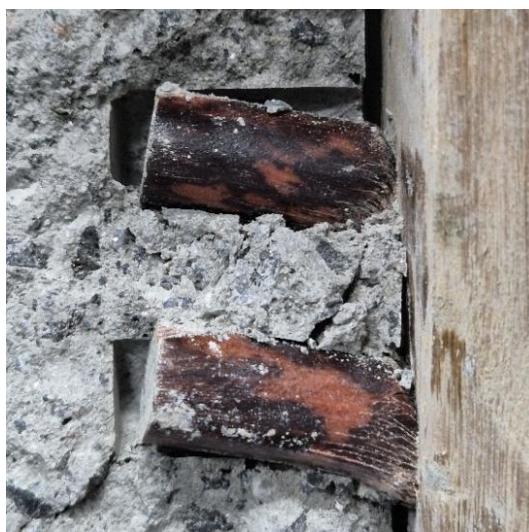
Figura 4.37 – Modos de ruptura típicos das peças mistas.



(a) Flexão da cavilha.



(b) Escorregamento da cavilha flexotacionada.



(c) flexão com formação de rótulas plásticas.



(d) flexão com cisalhamento perpendicular.

Fonte: Autor.

Os grupos com cavilhas inseridas a 90° apresentaram ruptura frágil, causado tanto pelo cisalhamento perpendicular da cavilha, presente no modo de ruptura nas séries de cavilhas de 16 mm, quanto pelo aparecimento de fissuras no concreto em conjunto da formação de

rótulas plásticas, característica presente nas séries de cavilhas com 20 mm de diâmetro. Souza (1997) estudou cavilhas com 31,4 mm de diâmetro inseridas perpendicularmente à madeira com ancoragem de 50 mm. Os resultados de Souza (1997) para o modo de ruptura convergiram com os obtidos nesta pesquisa, demonstrando que o esforço localizado gerado pela flexão da cavilha, resulta em fissuração do concreto. Como o modo de ruptura mudou de acordo com o diâmetro para esse grupo, pode-se afirmar que o diâmetro é determinante para a ocorrência de ruptura na cavilha ou no concreto.

4.3.3. Eficiência dos conectores

A avaliação da eficiência (E) dos conectores foi realizada por meio de uma abordagem analítica, utilizando o conjunto de equações do Método γ , conforme descrito na subseção 2.1.7 (p. 51). Para a aplicação do procedimento, adotou-se uma seção transversal composta por uma viga de madeira de eucalipto serrado sobreposta por uma laje de concreto maciço, conforme ilustrado na Figura 3.21 (p. 111).

Os valores do módulo de elasticidade do concreto (E_{ci}) e da madeira (E_w) utilizados nos cálculos corresponderam às médias obtidas na etapa de caracterização experimental, sendo de 13.010 MPa para a madeira de eucalipto e 41.122 MPa para o concreto. Considerou-se um vão teórico de 5,00 m para a viga mista, além de um espaçamento constante entre os conectores de 80 mm, valor mínimo previsto na NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Os resultados obtidos com essa análise estão apresentados na Tabela 4.12. De forma geral, os resultados indicam que a combinação entre cavilhas de maior diâmetro, inserção inclinada e reforço com GFRP proporciona um desempenho superior nas ligações mistas madeira-concreto, sendo uma alternativa viável para aplicações estruturais em sistemas híbridos.

Tabela 4.12 – Rígidez efetiva na flexão e eficiência de uma seção teórica.

	K_{ser} (N/mm)	γ_c	EI_{ef} (Nmm^2)	E (%)
D16-X-C	17.288	0,487	$2,99 \times 10^{12}$	49%
D16-X-R	22.026	0,548	$3,30 \times 10^{12}$	55%
D16-PAR-C	11.686	0,391	$2,49 \times 10^{12}$	39%
D16-PAR-R	14.622	0,446	$2,77 \times 10^{12}$	45%
D20-X-C	18.930	0,510	$3,11 \times 10^{12}$	51%
D20-X-R	29.822	0,621	$3,68 \times 10^{12}$	62%
D20-PAR-C	14.884	0,450	$2,80 \times 10^{12}$	45%
D20-PAR-R	20.471	0,530	$3,21 \times 10^{12}$	53%

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar experimentalmente a viabilidade do uso de cavilhas de madeira da espécie maçaranduba (classe D60), reforçadas com tecido de fibras de vidro em matriz epóxi (GFRP), como conectores em ligações mistas de madeira e concreto. Para isso, o estudo foi dividido em quatro etapas: caracterização da matéria-prima utilizada (madeira, concreto e fibra de vidro), produção das cavilhas e aplicação do reforço, caracterização física e mecânica das cavilhas e aplicação em ligações mistas do tipo *push-out test*. A seguir, são apresentados os principais resultados da pesquisa.

Em relação às características físicas das cavilhas:

- a) A matriz epóxi atuou como barreira física à absorção de água, reduzindo a taxa de absorção capilar em média de 84%. Entretanto, cavilhas com apenas uma camada de GFRP apresentaram desagregação precoce devido à expansão das fibras de vidro, causando tensões internas e fragilidade do revestimento.
- b) O uso de duas ou três camadas de reforço foi eficaz em impedir a penetração de água ao longo de 168 horas de ensaio. Para aplicações em estruturas mistas, a utilização de duas camadas já se mostrou suficiente para preservar as condições de hidratação do concreto nas primeiras horas após a moldagem e estanqueidade da madeira.

Em relação às características mecânicas das cavilhas:

- a) O reforço com GFRP aumentou gradualmente o momento de plastificação efetivo das cavilhas para cada camada adicionada, em até 84% para o caso de três camadas de reforço. Por outro lado, a ductilidade à flexão reduziu em até 25%. Os valores obtidos foram inferiores aos encontrados na literatura para outros materiais vegetais, porém a comparação direta é limitada devido às diferenças metodológicas entre os estudos.
- b) O confinamento proporcionado pelo GFRP aumentou em até 63% a resistência à compressão das cavilhas, porém não foi identificado melhorias nos valores de rigidez.
- c) No ensaio de arrancamento, a baixa relação de esbeltez (l_p/d) da ligação devido às limitações geométricas, resultou em valores reduzidos de resistência, em comparação com resultados realizados para conectores metálicos. Também, foi identificado grande variabilidade dos dados devido a presença de medula em alguns corpos de prova, evidenciando a necessidade de classificação dos corpos de prova.

- d) O aumento da espessura da linha de cola não foi suficiente para melhorar a aderência na interface cavilha-madeira. Considerando-se que a resistência ao arrancamento é um parâmetro secundário em ligações mistas, essa limitação teve impacto reduzido nos resultados globais da pesquisa.
- e) A resistência ao embutimento das cavilhas foi inferior àquela observada para conectores metálicos. Os modelos preditivos das normas brasileiras e internacionais não foram adequados para representar esse comportamento. O modelo proposto por Miller *et al.* (2010) apresentou melhor aderência aos resultados experimentais desta pesquisa e recomendado para o uso em futuros trabalhos sobre ligações cavilhadas.
- f) A resistência máxima ao embutimento foi pouco influenciada pelo ângulo de aplicação da força em relação às fibras da madeira (α), embora esse parâmetro tenha interferido no comportamento pós-ruptura. Peças com ângulos $\alpha \geq 45^\circ$ tenderam a apresentar falhas mais abruptas, enquanto a aplicação paralela às fibras ($\alpha = 0^\circ$) resultou em rupturas mais progressivas por esmagamento localizado.

Em relação ao ensaio de cisalhamento em ligações mistas madeira-concreto:

- a) A rigidez aumentou proporcional com o diâmetro das cavilhas, especialmente nas configurações de inserção perpendicular e sem reforço. Cavilhas de 16 mm posicionadas a 90° em relação às fibras apresentaram ruptura por cisalhamento perpendicular, caracterizada por falha abrupta e menor resistência. Por outro lado, cavilhas de 20 mm, também inseridas a 90° , apresentaram falha por flexão com formação de rótulas plásticas, aumentando a ductilidade do sistema. Assim, para inserção perpendicular, recomenda-se a adoção de cavilhas com maiores diâmetros.
- b) Cavilhas inseridas em 45° em relação às fibras apresentaram maior rigidez do que aquelas inseridas perpendicularmente. Esse comportamento está de acordo com a literatura, sendo explicado pela redistribuição das tensões internas e pelo estado combinado de flexocompressão e flexotração ao qual as cavilhas são submetidas. No entanto, a baixa aderência entre a cavilha tracionada e o concreto resultou em subutilização da capacidade resistência do sistema de conexão.
- c) As cavilhas reforçadas com GFRP apresentaram módulo de deslizamento de serviço compatível com materiais metálicos e inovadores previamente reportados na bibliografia, indicando que, com o reforço adequado, cavilhas de madeira podem ser utilizadas como conectores eficazes em estruturas mistas com concreto.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados obtidos nesta pesquisa tenham contribuído para o avanço do conhecimento sobre o uso de cavilhas de madeira reforçadas com GFRP em estruturas mistas de madeira e concreto, diversas questões permaneceram em aberto e podem ser exploradas em estudos futuros. A seguir, são apresentadas as principais lacunas identificadas:

- a) Investigar os mecanismos de aderência entre cavilhas de madeira e o concreto, com ênfase no comportamento da interface e no desenvolvimento de técnicas de melhoria da ligação, sem comprometer o processo de hidratação do cimento.
- b) Avaliar o efeito da densidade da madeira de substrato na resistência ao embutimento, considerando a influência da compatibilidade entre a cavilha e o bloco de madeira no desempenho da ligação.
- c) Desenvolver e validar modelos preditivos para os ensaios de embutimento e de flexão de cavilhas, considerando a influência do método adotado na obtenção dessas propriedades, com o objetivo de ampliar a aplicabilidade prática dos resultados.
- d) Elaborar modelos analíticos e numéricos capazes de representar o comportamento mecânico das ligações mistas com cavilhas reforçadas, permitindo análises paramétricas e a generalização dos resultados obtidos em laboratório.
- e) Realizar estudos experimentais com vigas mistas em escala real utilizando conectores cavilhados reforçados, avaliando o comportamento instantâneo do sistema de conexão.
- f) Investigar o comportamento à fluência de sistemas de conexão cavilhados reforçados ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ALAMU, O. T.; EWETE, F. K. Termites infestation on different Eucalyptus wood species and control using natural oil from plants. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 81, n. 6, p. 1535-1542, 2023.

ALMEIDA, D. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ALVES, Rejane Costa; OLIVEIRA, Ana Lúcia C.; CARRASCO, Edgar Vladimiro Mantilla. Propriedades físicas da madeira de Eucalyptus cloeziana F. Muell. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

ALVIM, R. D. C.; VELOSO, L. A. C. M.; SOUZA JUNIOR, H. O. D.; ALMEIDA, P. A. D. O. Piso misto de madeira-concreto para uma edificação residencial. **Anais: VII EBRAFEN**, 2000.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C1794-15**: Standard Test Methods for Determination of the Water Absorption Coefficient by Partial Immersion. West Conshohocken, 2015.

_____. **ASTM D198**: Standard Test Methods of Statics Tests of Lumber in Structural Size. West Conshohocken, 2015.

_____. **ASTM D3039**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites Materials. West Conshohocken, 2020.

_____. **ASTM D3822**: Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. West Conshohocken, 2020.

_____. **ASTM D4475-21**: Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method. West Conshohocken, 2021.

_____. **ASTM D5764**: Standard Test Method for Evaluation Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-based Products. West Conshohocken, 2023.

ANSARI, M. T. A.; SINGH, K. K.; AZAM, M. S. Effect of fabric areal density on the mechanical behaviour of symmetric and asymmetric woven GFRP composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 5649-5652, 2020.

ARAUJO, A. J. C.; BALBONI, B. M.; MOUTINHO, V. Physical and mechanical characterization of Astronium lecointei and Manilkara huberi branch wood. **Floresta e Ambiente**, v. 27, p. e20170468, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos e prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2018.

- _____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas em concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- _____. **NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR 7190-1:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 7190-3:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de provas isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 7190-4:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 8802:** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- _____. **NBR 8855-1:** Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- _____. **NBR 8855-2:** Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulos dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- AUCLAIR, S. C.; SORELLI, L.; SALENIKOVICH, A. A new composite connector for timber-concrete composite structures. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 84-92, 2016.
- AUGEARD, E.; FERRIER, E.; MICHEL, L. Mechanical Behavior of Timber-Concrete Composite Members under Cyclic Loading and Creep. **Eng. Struct.**, 210, 110289, 2020.
- BAO, Y.; LU, W.; YUE, K.; ZHOU, H.; LU, B.; CHEN, Z. Structural performance of cross-laminated timber-concrete composite floors with inclined self-tapping screws bearing unidirectional tension-shear loads. **Journal of Building Engineering**, v. 55, p. 104653, 2022.
- BEHILO, A. Viability of Timber-Concrete Composites for Outdoor Pedestrian Bridges. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Politécnico de Worcester, Worcester, 2025.
- BERGAMIN, R. V. **Sobre a performance estrutural de placas compostas de cross laminated timber e concreto.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Campinas, Campinas, 2024.
- CALIL JR, C. **Manual de Projeto e Construção de Pontes de Madeira.** São Carlos: Suprema, 252 p., 2006.
- CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. **Ciência e engenharia de materiais:** Uma introdução. 9^a ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2016.

CAMARGO, M. V. **Avaliação experimental do desempenho mecânico de cavilhas de madeira engenheirada.** Tese (Doutorado em Construção Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

CARVALHO, E. P.; CARRASCO, E. V. M. Influence of test specimen on experimental characterization of timber–concrete composite joints. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 8, p. 1313-1322, 2010.

CECCOTTI, A. Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 4, n. 3, p. 264–275, 2002.

CECCOTTI, A. Timber-concrete composite structures. In: BLASS, H. J. et al. *Timber Engineering – STEP 2*. Países Baixos: Centrum Hout, 1995.

CEN. BS **EN 26891**: Timber structures: joints made with mechanical fasteners: general principles for the determination of strength and deformation characteristics. London, 1991.

CERALDI, C.; D'AMBRA, C.; LIPPIELLO, M.; PROTA, A. Restoring of timber structures: Connections with timber pegs. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, p. 957-971, 2017.

CHE, C. **Investigating the effects of glass-fibre-reinforced polymer fabrics and bars on the flexural behaviour of sawn timber and glulam beams.** 2023. Dissertação de Mestrado. University of Waterloo.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). **EN 1382 - Timber Structures – Test methods - Withdrawal capacity of timber fasteners.** Bruxelas, Bélgica, 2016.

_____. **EN 1995-1:** Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1: General – Common rules and rules for buildings. Bruxelas, Bélgica, 2004.

_____. **EN 1995-2:** Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1: Bridges. Bruxelas, Bélgica, 2004.

_____. **EN 383:** Timber Structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. Bruxelas, Bélgica, 2007.

_____. **EN 409:** Timber structures – Tests methods – Determination of the yield moment of dowel type fasteners. Bruxelas, Bélgica, 2009.

COSENTINO, L.; FERNANDES, J.; MATEUS, R. Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals. **Applied Sciences**, v. 14, n. 11, p. 4850, 2024.

COUSIN, P.; HASSAN; M.; VIJAY; P. V.; ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. Chemical resistance of carbon, basalt, and glass fibers used in FRP reinforcing bars. **Journal of Composite materials**, v. 53, n. 26-27, p. 3651-3670, 2019.

CRESPO, J.; MAJANO-MAJANO, A.; LARA-BOCANEGRA, A. J.; GUAITA, M. Mechanical properties of small clear specimens of *Eucalyptus globulus* Labill. **Materials**, v. 13, n. 4, p. 906, 2020.

CRIADO, T.; RIBAS JUNIOR, A.; MOLINA, J. C. Low-cost timber bridges for rural areas: a field survey and recommendations of interest. **Engenharia Agrícola**, v. 44, n. 1, 2024.

CROCETTI, R.; SARTORI, T.; FLANSBJER, M. Timber-concrete composite structures with prefabricated FRC slab. In: World Conference on Timber Engineering, Trento, Itália, 2010.

DAŇKOVÁ, J.; MEC, P.; ŠAFRATA, J. Experimental investigation and performance of timber-concrete composite floor structure with non-metallic connection system. **Engineering Structures**, v. 193, p. 207-218, 2019.

DEAM, B. L.; FRAGIACOMO, M.; BUCHANAN, A. H. Connections for composite concrete slab and LVL flooring systems. **Materials and Structures**, v. 41, p. 495-507, 2008.

DERIKVAND, M.; KOTLAREWSKI, N.; LEE, M.; JIAO, H.; NOLAN, G. Characterisation of physical and mechanical properties of unthinned and unpruned plantation-grown *Eucalyptus nitens* H. Deane & Maiden lumber. **Forests**, v. 10, n. 2, p. 194, 2019.

DIAS, A.; SCHÄNZLIN, J.; DIETSCH, P. **Design of timber-concrete composite structures**. COST Action Report FP1402/WG4, Aachen, Alemanha, 2018.

DIAS, A. M. P. G.; SKINNER, J.; CREWS, K.; TANNERT, T. Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, p. 443-451, 2016.

DIAS, A. M. P. G. **Mechanical behaviour of timber-concrete joints**. Tese (Ph.D. em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica de Delft, Delft, Holanda, 2005.

DIAS, A. M. P. G.; JORGE, L. F. C. The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams. **Engineering structures**, v. 33, n. 11, p. 3033-3042, 2011.

DIAS, J. M. S.; LIMA, V. D. S.; SILVA, M. G. S. D.; NASCIMENTO, S. L.; SIVIERO, M. A.; VIEIRA, S. B.; SALES, A.; CUNHA, R. D. A.; CÉSAR, S. F. Barras de aço coladas em madeira compensada e LVL de paricá. **Ambiente Construído**, v. 25, p. e138725, 2025.

DIAS, J. M. S. **Ligações estruturais com barras de aço coladas com epóxi em madeiras de alta densidade: influência dos defeitos da madeira e dos erros de produção na resistência mecânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

DOURADO, N.; PEREIRA, F. A. M.; LOUSADA, J. L.; DE MOURA, M. F. S. F. Experimental and numerical analyses of wood boards joining using wood-pin connectors. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 556-565, 2019.

DU, H.; HU, X.; XIE, Z.; WANG, H. Study on shear behavior of inclined cross lag screws for glulam-concrete composite beams. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 132-143, 2019.

EGBO, M. K. A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 33, n. 8, p. 557-568, 2021.

ESMAEILDOUST, S.; TOMLINSON, D.; CHUI, Y. H. Performance of Timber-Concrete Composite (TCC) Systems Connected with Inclined Screws: A Literature Review. **Journal of Composites Science**, v. 9, n. 1, p. 13, 2025.

ESTÉVEZ-CIMADEVILA, J.; OTERO-CHANS, D.; MARTÍN-GUTIÉRREZ, E.; SUÁREZ-RIESTRA, F. Testing of different non-adherent tendon solutions to reduce short-term deflection in full-scale timber-concrete-composite T-section beams. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101437, 2020.

FAGGIANO, B.; IOVANE, G.; MARZO, A.; GRIPPA, M. R.; CALADO, L.; MAZZOLANI, F. M. Reinforcement of ancient floors by timber-concrete composite systems with collar connector. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings**, v. 174, n. 6, p. 491-503, 2021.

FERNANDES, F. **Análise do comportamento em temperatura ambiente e em situação de incêndio de vigas mistas de madeira e concreto sem e com reforço com fibras de vidro**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

FERNANDEZ-CABO, J. L.; ARRIAGA, F.; MAJANO-MAJANO, A.; IÑIGUEZ-GONZÁLEZ, G. Short-term performance of the HSB® shear plate-type connector for timber-concrete composite beams. **Construction and building materials**, v. 30, p. 455-462, 2012.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FIORELLI, J.; DIAS, A. Fiberglass-reinforced glulam beams: mechanical properties and theoretical model. **Materials Research**, v. 9, n. 3, p. 263-269, 2006.

FRAGIACOMO, M.; LUKASZEWSKA, E. Time-dependent behaviour of timber-concrete composite floors with prefabricated concrete slabs. **Engineering Structures**, v. 52, p. 687-696, 2013.

FRAGIACOMO, M.; LUKASZEWSKA, E.. Development of prefabricated timber-concrete composite floor systems. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings**, v. 164, n. 2, p. 117–129, 2011.

FRANKE, S.; MAGNIÈRE, N. **Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections**. In: Proceedings of International Network on Timber Engineering Research, INTER 2014, Bath, **Anais [...]**, 2014.

FRONTINI, F.; SIEM, J.; RENMÆLMO, R. Load-carrying capacity and stiffness of softwood wooden dowel connections. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 14, n. 3, p. 376-397, 2020.

FU, H., LI, Z.; ALHADDAD, W.; HE, M. Experimental evaluation and theoretical prediction of dowel-type joints connecting laminated veneer lumber with wood dowels. **Construction and Building Materials**, v. 416, p. 135248, 2024.

FU, Q.; YAN, L.; NING, T.; WANG, B.; KASAL, B. Behavior of adhesively bonded engineered wood-Wood chip concrete composite decks: Experimental and analytical studies. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118578, 2020.

GAN, Z.; SUN, Y.; SUN, X.; ZHOU, L.; HE, M. Push-out performance of inclined screw shear connectors used in nail-laminated timber-concrete composite. **Construction and Building Materials**, v. 366, p. 130175, 2023.

GLASS, S. V.; BOARDMAN, C. R.; FARKAS, N.; LAZARCIK, E. Q.; ZELINKA, S. L. Improved engineering model for water absorption in softwoods. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 30, n. 7, p. 694-708, 2024.

GONG, S.; HU, X.; AN, M.; CHEN, G.; LIU, H.; LI, T.; ZHANG, J. Shear characteristics of demountable bolt connectors in steel-cross laminated bamboo and timber composite beams. **Engineering Structures**, v. 336, p. 120489, 2025.

GONZALES, E.; TANNERT, T.; VALLEE, T. The impact of defects on the capacity of timber joints with glued-in rods. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 65, p. 33-40, 2016.

GOSWEIN, V.; AREHART, J.; PHAN-HUY, C.; POMPONI, F.; HABERT, G. Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings. **Build. Cities**, v. 3, p. 745–755, 2022.

GRUNWALD, C.; VALLÉE, T.; FECHT, S.; BLETZ-MÜHLDORFER, O.; DIEHL, F.; BATHON, L.; MYSICKI, S.; SCHOLZ, R.; WALTHER, F. Rods glued in engineered hardwood products part I: Experimental results under quasi-static loading. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 90, p. 163-181, 2019.

HADIGHEH, S. A.; MCDOUGALL, R.; WISEMAN, C.; REID, L. Evaluation of composite action in cross laminated timber-concrete composite beams with CFRP reinforcing bar and plate connectors using Digital Image Correlation (DIC). **Engineering Structures**, v. 232, p. 111791, 2021.

HAN, L.; KUTNAR, A.; SANDAK, J.; ŠUŠTERŠIČ, I.; SANDBERG, D. Adhesive-and metal-free assembly techniques for prefabricated multi-layer engineered wood products: A review on wooden connectors. **Forests**, v. 14, n. 2, p. 311, 2023.

HE, G.; XIE, L.; WANG, X. A.; YI, J.; PENG, L.; CHEN, Z. A.; GUSTAFSSON, P. J.; CROCETTI, R. Shear behavior study on timber-concrete composite structures with bolts. **BioResources**, v. 11, n. 4, p. 9205-9218, 2016.

HENS, I.; SOLNOSKY, R.; BROWN, N. C. Design space exploration for comparing embodied carbon in tall timber structural systems. **Energy and Buildings**, v. 244, p. 110983, 2021. **Energy and Buildings**, v. 244, p. 110983, 2021.

HUTSMAN. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico Aradur® 450 BR.** São Paulo, 17 p., 2020.

HUTSMAN. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico Araldite® GY 260 BR.** São Paulo, 17 p., 2020.

ICIMOTO, F. **Dormentes de madeira lamelada colada (MLC) reforçados com tecidos de fibra de vidro.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual IBÁ.** Publicações IBÁ, São Paulo, 99 p., 2024.

ILGIN, H. E.; ASLANTAMER, Ö. N. Analyzing the key architectural and structural factors in the formation of tall timber projects in Europe. **Cogent Engineering**, v. 11, n. 1, p. 2348737, 2024.

JARDIM, P.; MONTEIRO, S.; AZEVEDO, A.; ARAÚJO, V.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L. Preservation and maintenance of wood-based structures of historic buildings: A systematic literature review on structural recovery techniques. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, 2025.

JEONG, G. Y.; KONG, J. H. Evaluating bearing properties of wood peg connection using four different test methods. **Wood and Fiber Science**, v. 50, n. 1, p. 20-32, 2018.

JIANG, Y.; HONG, W.; HU, X.; CROCETTI, R.; WANG, L.; SUN, W. Early-age performance of lag screw shear connections for glulam-lightweight concrete composite beams. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 36-42, 2017.

JIANG, Y.; CROCETTI, R. CLT-concrete composite floors with notched shear connectors. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 127-139, 2019.

JOCKWER, R.; WIEHLE, P.; PALMA, P.; KLIPPEL, M.; FRANGI, A.; HEBEL, D. Structural behaviour and design of timber connections with dowels and slotted-in plates made of bamboo composites. In: **Proc. World Conf. Timber Eng., Seoul, Republic of Korea.** 2018.

JOHANSEN, K. Theory of timber connections. **IABSE Journal**, v. 9, 249–262, 1949.

Jung, K.; Murakami, S.; Kitamori, A.; Chang, W.; Komatsu, K. Improvement of glued-in-rod joint system using compressed wooden dowel. **Holzforschung**, v. 64, n. 6, p. 799-804, 2010.

KANÓCZ, J.; BAJZECEROVÁ, V.; ŠTELLER, Š. Timber-concrete composite elements with various composite connections. Part 3: Adhesive connection. **Wood Res**, v. 60, n. 6, p. 939-952, 2015.

KARIMI, S.; JAVADPOUR, S. Comparison of the role of milled glass and carbon fibers on mechanical properties of (bisphenol A)-based epoxy composites. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, v. 24, n. 2, p. 130-138, 2018.

KAUFMANN, M.; KOLBE, J.; VALLÉE, T. Hardwood rods glued into softwood using environmentally sustainable adhesives. **The Journal of Adhesion**, v. 94, n. 11, p. 991-1016, 2018.

KHAN, I. U.; SUBHANI, M.; GHABRAIE, K.; ASHRAF, M. Exploring and refining testing approaches for hardwood dowels under axial and flexural loading: an experimental and numerical study. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1-23, 2025.

KHAN, R.; NIEDERWESTBERG, J.; CHUI, Y. Influence of insertion angle, diameter and thread on embedment properties of self-tapping screws. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 3, p. 707-718, 2021.

KOIZUMI, A.; JENSEN, J. L.; SASAKI, T. Structural joints with glued-in hardwood dowels. In: **International RILEM symposium on joints in timber structures, Stuttgart, Germany**. 2001. p. 403-412.

KORDZIEL, S., GLASS, S. V., BOARDMAN, C. R., MUNSON, R. A., ZELINKA, S. L., PEI, S., TABARES-VELASCO, P. C. Hygrothermal characterization and modeling of cross-laminated timber in the building envelope. **Building and Environment**, v. 177, p. 106866, 2020.

KUMAR, A., VLACH, T., LAIBLOVA, L., HROUDA, M., KASAL, B., TYWONIAK, J., HAJEK, P. Engineered bamboo scrimber: Influence of density on the mechanical and water absorption properties. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 815-827, 2016.

LAMOTHE, S., SORELLI, L., BLANCHET, P., GALIMARD, P. Engineering ductile notch connections for composite floors made of laminated timber and high or ultra-high performance fiber reinforced concrete. **Engineering Structures**, v. 211, p. 110415, 2020.

LESKOVAR, V.; PREMROV, M. A review of architectural and structural design typologies of multi-storey timber buildings in Europe. **Forests**, v. 12, n. 6, p. 757, 2021.

LI, C., WENG, Q., CHEN, J. B., LI, M., ZHOU, C., CHEN, S., ZHOU, W., GUO, D., LU, C., CHEN, J., XIANG, D., GAN, S. Genetic parameters for growth and wood mechanical properties in Eucalyptus cloeziana F. Muell. **New Forests**, v. 48, p. 33-49, 2017.

LI, S.; HADIGHEH, S. A. Enhancing the load-slip behaviour of cross-laminated timber-concrete composite using FRP connections: Experimental and numerical investigation. **Engineering Structures**, v. 336, p. 120479, 2025.

LI, T. Y.; CHEN, J. Q.; XIAO, Y.; SHAN, B.; LI, Y. Y.; QIN, P. C. Structural behavior of fully prefabricated glulam-concrete composite beams constructed of innovative connectors. **Engineering Structures**, v. 308, 2024.

LING, Z., LI, Z., RONG, X., SHI, H. Effect of test configurations and loading protocols on performance of timber-concrete connectors. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130244, 2023.

LIU, P.; DU, H.; CHEN, Z.; HU, X. Review of long-term performance of timber-concrete composite beams. **BioResources**, Raleigh, v. 20, n. 1, p. 2374-2390, 02 2025.

LUKACEVIC, M., AUTENGRUBER, M., RAIMER, T., EBERHARDSTEINER, J., FÜSSL, J. Effect of cast-in-place concrete application on moisture distribution in timber-concrete composite floors with notched connections investigated via finite element simulations. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 103005, 2021.

LUKASZEWSKA, E. **Development of prefabricated timber-concrete composite floors**. Tese (Doutorado em Engenharia Estrutural). Universidade Tecnologica de Luleå, Luleå, 2009.

LUKIĆ, I., PREMROV, M., PASSER, A., LESKOVAR, V. Ž. Embodied energy and GHG emissions of residential multi-storey timber buildings by height – a case with structural connectors and mechanical fasteners. **Energy and Buildings**, v. 252, p. 111387, 2021.

MARCHI, L.; SCOTTA, R.; POZZA, L. Experimental and theoretical evaluation of TCC connections with inclined self-tapping screws. **Materials and Structures**, v. 50, p. 1-15, 2017.

MARINI, L. J., CAVALHEIRO, R. S., DE ARAUJO, V. A., CORTEZ-BARBOSA, J., DE CAMPOS, C. I., MOLINA, J. C., SILVA, D., LAHR, F. A. R., CHRISTOFORO, A. L. Estimation of mechanical properties in Eucalyptus woods towards physical and anatomical parameters. **Construction and Building Materials**, v. 352, p. 128824, 2022a.

MARINI, L. J., CAVALHEIRO, R. S., ARAUJO, V. A. D., LAHR, F. A. R., CHRISTOFORO, A. L. Estimativa da resistência à tração nas madeiras de dez espécies de eucalipto em função de parâmetros anatômicos e da densidade aparente. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e20220196, 2022b.

MARINI, L. J. **Estimativa de propriedades mecânicas de madeiras de eucalipto em função de parâmetros físicos e anatômicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil. 2022.

MARTINS, C., SANTOS, P., ALMEIDA, P., GODINHO, L., DIAS, A. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors. **Construction and Building Materials**, v. 101, n. 1, p. 684-691, 2015.

MARTINS, C., DIAS, A. M., COSTA, R., SANTOS, P. Environmentally friendly high performance timber–concrete panel. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 1060-1069, 2016.

MARTINS, G. C. A.; CHAHUD, E.; LAHR, F. A. R. Avaliação da influência da região de extração em propriedades físicas e mecânicas para a madeira Maçaranduba (Manilkara sp.). **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 7, p. e16506-e16506, 2025.

MEHRA, S., O'CEALLAIGH, C., SOTAYO, A., GUAN, Z., HARTE, A. M. Structural characterisation of laterally loaded glued and compressed wood dowel laminated timber portal frames produced using compressed wood connectors. **Construction and Building Materials**, v. 457, p. 139107, 2024.

MEHRA, S. **Development of Non-metallic and adhesive-free timber-timber moment connections using compressed wood connectors.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), National University of Ireland Galway, 2020.

MILLER, J. F.; SCHMIDT, R. J.; BULLEIT, W. M. New yield model for wood dowel connections. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 10, p. 1255-1261, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e promoção de Políticas Públicas.** Subsídios para a promoção da Construção Sustentável. 2014. Disponível em: <<http://www.cbc.org.br/website/aspectos-construcao-sustentavel/show.asp?ppgCode=31E2524C-905E-4FC0-B784-118693813AC4>>.

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

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Structural efficiency of full-scale timber-concrete composite beams strengthened with fiberglass reinforced polymer. **Composite Structures**, v. 128, p. 145–154, 2015.

MIRDAD, M. A. H., JUCUTAN, A., KHAN, R., NIEDERWESTBERG, J., CHUI, Y. H. Embedment and withdrawal stiffness predictions of self-tapping screws in timber. **Construction and Building Materials**, v. 345, p. 128394, 2022.

MOERMAN, B., LI, M., CAO, Y., LIM, H. Compressive behaviour of hardwood dowel reinforced CLT loaded perpendicular-to-grain. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124137, 2021.

MOLINA, J. C. **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MOLINA, J. C.; CALIL JR, C. Sistema misto de madeira e concreto: uma abordagem numérico e experimental para altas temperaturas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.

MÜLLER, K.; FRANGI, A.. Micro-notches as a novel connection system for timber-concrete composite slabs. **Engineering Structures**, v. 245, p. 112688, 2021.

NADIR, Y., NAGARAJAN, P., AMEEN, 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.

NAGARAJA, K. C., RAJANNA, S., PRAKASH, G. S., KOPPAD, P. G., ALIPOUR, M. Studying the effect of different carbon and glass fabric stacking sequence on mechanical properties of epoxy hybrid composite laminates. **Composites Communications**, v. 21, p. 100425, 2020.

NAJM, H.; SECARAS, J.; BALAGURU, P. Compression tests of circular timber column confined with carbon fibers using inorganic matrix. **Journal of materials in civil engineering**, v. 19, n. 2, p. 198-204, 2007.

NAMARI, S., DROSKY, L., PUMLITZ, B., HALLER, P., SOTAYO, A., BRADLEY, D., MEHRA, S., O'CEALLAIGH, C., HARTE A. M., EL-HOUJERYI, I., OUDJENE, M., GUAN, Z. Mechanical properties of compressed wood. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124269, 2021.

NASCIMENTO, L. B., DAS NEVES BRANDES, A. F., VALENTE, F. D. W., TAMAIO, N. Anatomical identification of commercialized wood in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 40, p. 291-329, 2017.

O'CALLAGHAM, R.; LACROIX, D.; KIM, K. Experimental investigation of the compressive behaviour of GFRP wrapped spruce-pine-fir square timber columns. **Engineering Structures** v. 252, 113616, 2022.

OKOH, E. T. Water absorption Properties of some tropical timber species. **Journal of Energy and Natural Resources**, v. 3, n. 2, p. 20-24, 2014.

OTTOOM, O. F., LOKUGE, W., KARUNASENA, W., MANALO, A. C., OZBAKKALOGLU, T., EHSANI, M. R. Flexural behaviour of circular timber columns strengthened by glass fibre reinforced polymer wrapping system. **Structures**, v. 38, p. 1349-1367, 2022.

OTTENHAUS, L.; LI, Z.; CREWS, K. Half hole and full hole dowel embedment Strength: A review of international developments and recommendations for Australian softwoods. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 128130, 2022.

PALMA, P., KOBEL, P., MINOR, A., FRANGI, A. Dowelled timber connections with internal members of densified veneer wood and fibre-reinforced polymer dowels. In: **WCTE 2016–World Conference on Timber Engineering**, Vienna, Austria. 2016.

PEREIRA, M. C. de M., SOHIER, L. A. P., DESCAMPS, T., JUNIOR, C. C. Doweled cross laminated timber: Experimental and analytical study. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121820, 2021.

PERTUZZATTI, A., CONTE, B., MISSIO, A. L., GATTO, D. A., HASELEIN, C. R., SANTINI, E. J. Influência da umidade na resistência da madeira de eucalipto a impactos. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00092514, 2017.

PIGOZZO, J. C., ARROYO, F. N., ALMEIDA, D. H. D., CHRISTOFORO, A. L., JUNIOR, C. C., LAHR, F. A. R. Determination of the Sliding Modulus and Limit Strength of Shear Connectors for Mixed Wood-Concrete Structures. **Int. J. Mater. Eng**, v. 8, n. 4, p. 59-65, 2018.

PIGOZZO, J. C. **Estudos e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 386 p., 2004.

PIZZO, B.; SMEDLEY, D.. Adhesives for on-site bonding: Characteristics, testing and prospects. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 67-77, 2015.

POPOVICS, Jonh S.; ZEMAJTIS, J.; SHKOLNIK, I. A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete. **ACI-CRC Final Report**, v. 16, 2008.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M.; RODD, P. D. Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy gluelines. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 5, p. 580-588, 2009.

RAFTERY, G. M.; WHELAN, C. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. **Construction and building materials**, v. 52, p. 209-220, 2014.

RAMKUMAR, V. R., ANAND, N., PRAKASH, V., SUJATHA, D., MURALI, G. Experimental study on the performance of fiber-reinforced laminated veneer lumber produced using Melia dubia for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 417, p. 135325, 2024.

RATSCH, N., BÖHM, S., VOß, M., KAUFMANN, M., VALLÉE, T. Influence of imperfections on the load capacity and stiffness of glued-in rod connections. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 200-211, 2019.

REYNOLDS, T.; CASAGRANDE, D.; TOMASI, R. Comparison of multi-storey cross-laminated timber and timber frame buildings by in situ modal analysis. **Construction and building materials**, v. 102, p. 1009-1017, 2016.

ROAD AND TRAFFIC AUTHORITY OF NSW (RTA). **Timber Bridge Manual**. Grafton, Australia, 2008.

RODRIGUES, J. N.; DIAS, A. M. P. G.; PROVIDÊNCIA, P. Timber-concrete composite bridges: State-of-the-art review. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 6630-6649, 2013.

RODRIGUES, J. N.; PROVIDÊNCIA, P.; DIAS, A. M. P. G. Sustainability and lifecycle assessment of timber-concrete composite bridges. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 23, n. 1, p. 04016025, 2017.

RODRIGUES, S. de O., MORAIS, V. C., LIMA, J. B., JÚNIOR, S., FRANCO, M. E. M., CARVALHO, V. B., BARBOSA, J. L. DIAS, J. M. S. Influence of the existence of a line of PVA-C glue on a square section composed of a beam of maçaranduba (*Manilkara* spp.) **Brazilian Applied Science Review**, v. 6, n. 4, p. 13946-13956, 2022.

RUAN, G.; FILZ, G. H.; FINK, G. Shear capacity of timber-to-timber connections using wooden nails. **Wood Material Science & Engineering**, v. 17, n. 1, p. 20-29, 2022.

RUDE, T. J.; STRAIT JR, L. H.; RUHALA, L. A. Measurement of fiber density by helium pycnometry. **Journal of composite materials**, v. 34, n. 22, p. 1948-1958, 2000.

SAHU, P.; GUPTA, M. K. Sisal (*Agave sisalana*) fibre and its polymer-based composites: a review on current developments. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 36, n. 24, p. 1759-1780, 2017.

SANDBERG, K.; SALIN, J. Liquid water absorption in dried Norway spruce timber measured with CT scanning and viewed as a percolation process. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1, p. 207-219, 2012.

SANTOS, L. F. **Estruturas mistas de cross laminated timber (CLT) e concreto: análise experimental de conectores semirrígidos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Campinas, Campinas, 2024.

SATHISHKUMAR, T. P.; SATHEESHKUMAR, S.; NAVNEEN, J. Glass fiber-reinforced polymer composites—a review. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 33, n. 13, p. 1258-1275, 2014..

SAWATA, K.; YASUMURA, M. Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners. **Journal of Wood Science**, v. 48, p. 138-146, 2002.

SCHÄFERS, M.; SEIM, W. Investigation on bonding between timber and ultra-high performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 7, p. 3078-3088, 2011.

SCHEFFLER, C., FÖRSTER, T., MÄDER, E., HEINRICH, G., HEMPEL, S., MECHTCHERINE, V. Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 355, n. 52-54, p. 2588-2595, 2009.

SCHMIDT, R. J.; MACKAY, R. B. **Timber frame tension joinery.** University of Wyoming, 1997.

SCHMIDT, R. J.; DANIELS, C. E. Design considerations for mortise and tenon connections. **Report for Timber Framers Guild, Becket, MA**, 1999.

SCHNEID, E.; DE MORAES, P. D. Modification factors of the embedding strength dependent on the temperature and load-to-grain angle for two wood species planted in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121503, 2021.

SCHOBER, K. U., HARTE, A. M., KLIGER, R., JOCKWER, R., XU, Q., CHEN, J. F. FRP reinforcement of timber structures. **Construction and building materials**, v. 97, p. 106-118, 2015.

SEBASTIAN, W.; CAO, C. Hardwood and softwood timber-natural stone composite connections. **Construction and Building Materials**, v. 418, p. 134707, 2024.

SEGUNDINHO, P. G. A. **Análise teórico-experimental de um tabuleiro misto madeira-concreto composto por vigas circulares.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira. 145p. 2005.

SHAN, B., LI, T. Y., DENG, J. Y., ZOU, Y., XIAO, Y., YU, Q., ZHANG, C. Q. Experimental research on novel RPC-steel composite connections for prefabricated glulam-concrete composite beams. **Construction and Building Materials**, v. 333, p. 127397, 2022.

SHI, W., ANGST, U. M., YILMAZ, D., WENK, K., FRANGI, A. Corrosion of Metallic Fasteners in Timber-Concrete Composite Structures. **Materials and Structures**, v. 52, p. 1-11, 2019.

SIDDIKA, Ayesha *et al.* Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. **Engineering Failure Analysis**, v. 130, p. 105766, 2021.

SIDDIKA, A., AL MAMUN, M. A., ASLANI, F., ZHUGE, Y., ALYOUSEF, R., HAJIMOHAMMADI, A. Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube–epoxy nanocomposite coating: effects of CNT morphology and dispersion state. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 41, n. 4, p. 539-548, 2010.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. do. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazonica**, v. 43, p. 179-184, 2013.

SKINNER, J.; MARTINS, C.; BREGULLA, J.; HARRIS, R.; PAINE, K.; WALKER, P.; DIAS, A. M. P. G. Concrete upgrade to improve the vibration response of timber floors. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – **Structures and Buildings**, v. 167, n. 9, p. 559-568, 2014.

SORIANO, J. **Estruturas mistas em madeira e concreto: análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 264 p., 2001.

SOTAYO, A., BRADLEY, D., BATHER, M., SAREH, P., OUDJENE, M., EL-HOUJEYRI, I., HARTE, A. M., MEHRA, S., O'CEALLAIGH, C., HALLER, P., NAMARI, S., MAKRADI, A. M., BELOUETTAR, S., BOUHALA, L., DENEUFBOURG, F., GUAN, Z. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. **Developments in the Built Environment**, v. 1, p. 100004, 2020.

SOUZA, Á. **Análise experimental do comportamento de conectores entre madeira e concreto em corpos de prova de cisalhamento: efeitos da variação do tipo de conector**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

SOUZA, M. S. G. de. **Avaliação de pisos mistos de seção Pi formados por vigas de madeira lamenada colada e concreto**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

SOUZA, L. V. C. de, ZANATTA, B. P., SIQUEIRA, A. B. D., PEREIRA, B. L. C., LENGOWSKI, E. C., OLIVEIRA, A. C. Physical, mechanical, and combustion properties of twelve wood species from the Brazilian Amazon. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 27, 2025.

STAMATOPOULOS, H.; MALO, K. A. Withdrawal capacity of threaded rods embedded in timber elements. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 387-397, 2015.

TÉTREAU, M. G., ROLLO, G., OUDJENE, M., FAFARD, M. Experimental investigation on the mechanical characteristics of a novel hybrid densified wood-filled aluminum tube dowel for timber connections. **Engineering Proceedings**, v. 43, n. 1, p. 44, 2023.

TEXIGLASS. **Ficha técnica de tecido**. Vinhedo, 1 p., 2018.

THOMSON, A. **The structural performance of non-metallic timber connections.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de Bath, Bath, Reino Unido, 2010.

TOUMLPANAKI, E.; RAMAGE, M. H. Glued-in CFRP and GFRP rods in block laminated timber subjected to monotonic and cyclic loading. **Composite Structures**, v. 272, p. 114201, 2021.

VAHEDIAN, A.; SHRESTHA, R.; CREWS, K. Effective bond length and bond behaviour of FRP externally bonded to timber. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 742-754, 2017.

VALLE, Â. D., MORAES, P. D. D., MANTOVANI, G. Z., FAGUNDES, H. Influence of temperature on the adhesion of fibre reinforced polymers to timber surface. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 25-38, 2019.

VETTER, Y. **Investigating the Behaviour of Short-Span FRP-Reinforced Glulam Beams.** 2022. Dissertação de Mestrado. University of Waterloo.

VIANA, A. C. C., EBERSBACH, F. G., DE MORAES, P. D., WEINGAERTNER, W. L. Influence of pre-drilling hole and feed rate 601 on welded surface strength of pine-itauba joints. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01473, 2022.

VILGUTS, A.; PHILLIPS, A. R.; JERVES, R.; ANTONOPOULOS, C.; GRIECHEN, D. Monotonic testing of single shear-plane CLT-to-CLT joint with hardwood dowels. **Journal of Building Engineering**, v. 88, p. 109252, 2024.

WACKER, J. P.; DIAS, A.; HOSTENG, T. K. Investigation of early timber–concrete composite bridges in the United States. In: **ICTB 2017 – 3rd International Conference on Timber Bridges**, Skellefteå, Sweden. Proceedings [...]. p. 11. 2017.

WACKER, J. P.; DIAS, A. M. P. G.; HOSTENG, T. K. 100-year performance of timber–concrete composite bridges in the United States. **Journal of Bridge Engineering**, v. 25, n. 3, p. 04020006, 2020.

WANG, Y.; WANG, T.; CROCETTI, R.; SCHWEIGLER, M.; WÅLINDER, M. Embedment behavior of dowel-type fasteners in birch plywood: Influence of load-to-face grain angle, test set-up, fastener diameter, and acetylation. **Construction and Building Materials**, v. 384, p. 131440, 2023.

WON, J. P., YOON, Y. N., HONG, B. T., CHOI, T. J., LEE, S. J. Durability characteristics of nano-GFRP composite reinforcing bars for concrete structures in moist and alkaline environments. **Composite Structures**, v. 94, n. 3, p. 1236-1242, 2012.

XU, B. H., LIN, J. B., ZHAO, Y. H., BOUCHAÏR, A. Embedment behaviour of fully threaded bolts in glued laminated timber. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 81, n. 2, p. 369-386, 2023.

XU, B. H., YU, K. B., JIAO, S. Y., ZHAO, Y. H., ZHANG, B. Pull-out performance of timber joints with glued-in densified wood dowels. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 8, p. 04023244, 2023.

XU, Y., DONG, Z., JIA, C., WANG, Z., LU, X. Bamboo Nail: A Novel Connector for Timber Assemblies. **Journal of Renewable Materials**, v. 9, n. 9, p. 1609-1620, 2021.

YEOH, D. **Behaviour and design of timber-concrete composite floor system**. Tese (Ph.D. em Engenharia Civil). Universidade de Canterbury, Canterbury, Nova Zelândia, 2010.

ZEITZ, A.; GRIFFIN, C. T.; DUSICKA, P. Comparing the embodied carbon and energy of a mass timber structure system to typical steel and concrete alternatives for parking garages. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 126-133, 2019.

ZHOU, A., TAM, L. H., YU, Z., LAU, D. Effect of moisture on the mechanical properties of CFRP–wood composite: an experimental and atomistic investigation. **Composites Part B: Engineering**, v. 71, p. 63-73, 2015.

ZHOU, W., LI, H., MOHRMANN, S., LI, H., XIONG, Z., LORENZO, R. Evaluation on the axial compression mechanical properties of short BFRP laminated bamboo lumber columns. **Journal of Building Engineering**, v. 53, p. 104483, 2022.

ZHU, W., YANG, H., LIU, W., SHI, B., LING, Z., TAO, H. Experimental investigation on innovative connections for timber–concrete composite systems. **Construction and Building Materials**, v. 207, p. 345-356, 2019.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Resultados individuais do *push-out test* para o grupo D16-X-C.

	$F_{10\%}$	$v_{10\%}$	$F_{40\%}$	$v_{40\%}$	$F_{60\%}$	$v_{60\%}$	$F_{80\%}$	$v_{80\%}$	F_u	v_u	$K_{40\%}$	$K_{60\%}$	$K_{80\%}$	K_u
	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>
CP1	4,32	0,40	17,26	1,17	25,89	2,01	34,53	3,31	43,16	7,27	16,73	13,40	10,38	5,66
CP2*	2,63	0,08	10,52	2,32	15,77	4,93	21,04	7,00	26,25	15,00	3,52	2,71	2,66	1,58
CP3	4,07	0,10	16,31	0,92	24,46	1,58	32,62	2,57	40,77	5,20	14,97	13,75	11,56	7,20
CP4	5,23	0,33	20,93	1,11	31,40	1,66	41,86	2,66	52,33	6,50	20,22	19,76	15,72	7,64
CP5	7,48	0,43	29,92	1,48	44,87	2,04	59,83	2,71	74,79	3,82	21,30	23,22	22,90	19,81
CP6	3,60	0,10	14,39	0,92	21,58	1,67	28,78	2,76	35,97	5,04	13,22	11,48	9,45	6,55
Mín.	2,63	0,08	10,52	0,92	15,77	1,58	21,04	2,57	26,25	3,82	3,52	2,71	2,66	1,58
Máx.	7,48	0,43	29,92	2,32	44,87	4,93	59,83	7,00	74,79	15,00	21,30	23,22	22,90	19,81
Média	4,94	0,27	19,76	1,12	29,64	1,79	39,52	2,80	49,40	5,57	17,29	16,32	14,00	9,37
DP	1,54	0,16	6,16	0,23	9,23	0,22	12,30	0,29	15,39	1,34	3,43	4,95	5,52	5,88
CV	31,14%	59,35%	31,16%	20,75%	31,14%	12,06%	31,13%	10,45%	31,14%	24,13%	19,81%	30,32%	39,43%	62,79%

Legenda: F_i = Força em relação i da força última. K_i = Módulo de deslizamento entre 10% e uma relação i da força última. v_i = Deslizamento em relação i do deslizamento último. F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação, em %.

*CP2 excluído da análise estatística por erro na execução do ensaio.

Fonte: Autor.

Tabela A.2 – Resultados individuais do *push-out test* para o grupo D16-X-R.

	$F_{10\%}$	$v_{10\%}$	$F_{40\%}$	$v_{40\%}$	$F_{60\%}$	$v_{60\%}$	$F_{80\%}$	$v_{80\%}$	F_u	v_u	$K_{40\%}$	$K_{60\%}$	$K_{80\%}$	K_u
	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>
CP1	3,46	0,34	18,83	1,653	20,74	1,99	27,65	3,61	34,56	11,61	11,67	10,43	7,38	2,76
CP2	4,57	0,34	18,26	0,904	27,40	1,52	36,53	2,29	45,66	5,21	24,19	19,34	16,37	8,43
CP3	6,85	0,44	27,39	1,079	41,09	1,43	54,77	2,34	68,47	5,15	32,28	34,65	25,28	13,10
CP4*	3,09	0,28	12,36	0,864	18,55	1,58	24,72	4,31	30,91	11,83	15,86	11,86	5,37	2,41
CP5	7,10	0,44	28,42	1,146	42,62	1,60	56,83	2,36	71,04	8,12	30,01	30,42	25,84	8,32
CP6	4,21	0,33	16,86	1,388	25,28	2,06	33,71	3,34	42,14	7,17	11,99	12,21	9,81	5,55
Mín.	3,09	0,28	12,36	0,86	18,55	1,43	24,72	2,29	30,91	5,15	11,67	10,43	5,37	2,41
Máx.	7,10	0,44	28,42	1,65	42,62	2,06	56,83	4,31	71,04	11,83	32,28	34,65	25,84	13,10
Média	5,24	0,38	21,95	1,23	31,43	1,72	41,90	2,79	52,37	7,45	22,03	21,41	16,94	7,63
DP	1,64	0,06	5,49	0,29	9,83	0,29	13,11	0,64	16,39	2,65	9,77	10,79	8,53	3,84
CV	31,25%	15,05%	25,02%	23,62%	31,29%	16,63%	31,29%	22,80%	31,29%	35,60%	44,34%	50,42%	50,38%	50,36%

Legenda: F_i = Força em relação i da força última. K_i = Módulo de deslizamento entre 10% e uma relação i da força última. v_i = Deslizamento em relação i do deslizamento último. F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação, em %.

*CP4 excluído da análise estatística por erro na execução do ensaio.

Fonte: Autor.

Tabela A.3 – Resultados individuais do *push-out test* para o grupo D16-PAR-C.

	$F_{10\%}$	$v_{10\%}$	$F_{40\%}$	$v_{40\%}$	$F_{60\%}$	$v_{60\%}$	$F_{80\%}$	$v_{80\%}$	F_u	v_u	$K_{40\%}$	$K_{60\%}$	$K_{80\%}$	K_u
	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>								
CP1	6,51	0,57	26,02	2,84	39,04	4,76	52,05	6,95	65,06	12,25	8,58	7,76	7,14	5,01
CP2	5,79	0,83	23,15	3,51	34,72	6,14	46,30	8,95	57,86	15,00	6,48	5,45	4,99	3,68
CP3	7,31	0,63	29,25	1,86	43,87	2,50	58,50	3,55	73,12	14,25	17,89	19,52	17,50	4,83
CP4	8,39	0,78	33,55	2,52	50,34	3,53	67,12	5,67	83,90	11,50	14,42	15,23	11,99	7,04
CP5	5,62	0,73	22,50	2,78	33,73	5,15	44,98	7,61	56,22	3,22	8,20	6,36	5,71	20,27
CP6	8,52	0,68	34,04	2,43	51,05	3,05	68,06	3,64	85,08	4,88	14,55	17,95	20,12	18,22
Mín.	5,62	0,57	22,50	1,86	33,73	2,50	44,98	3,55	56,22	3,22	6,48	5,45	4,99	3,68
Máx.	8,52	0,83	34,04	3,51	51,05	6,14	68,06	8,95	85,08	15,00	17,89	19,52	20,12	20,27
Média	7,02	0,70	28,08	2,66	42,12	4,19	56,17	6,06	70,21	10,18	11,69	12,04	11,24	9,84
DP	1,26	0,10	5,03	0,55	7,55	1,39	10,06	2,18	12,58	4,95	4,54	6,25	6,40	7,39
CV	17,94%	13,82%	17,91%	20,57%	17,92%	33,15%	17,92%	36,02%	17,92%	48,57%	38,86%	51,85%	56,96%	75,11%

Legenda: F_i = Força em relação i da força última. K_i = Módulo de deslizamento entre 10% e uma relação i da força última. v_i = Deslizamento em relação i do deslizamento último. F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Autor.

Tabela A.4 – Resultados individuais do *push-out test* para o grupo D16-PAR-R.

	$F_{10\%}$	$v_{10\%}$	$F_{40\%}$	$v_{40\%}$	$F_{60\%}$	$v_{60\%}$	$F_{80\%}$	$v_{80\%}$	F_u	v_u	$K_{40\%}$	$K_{60\%}$	$K_{80\%}$	K_u
	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>
CP1	7,99	0,33	31,96	1,59	47,93	3,30	63,91	6,39	79,89	12,43	19,00	13,41	9,22	5,94
CP2	6,67	0,52	26,68	2,17	40,01	3,59	53,36	6,43	66,69	13,56	12,13	10,85	7,89	4,60
CP3	6,62	0,85	26,50	1,94	39,76	2,82	53,00	8,45	66,25	13,45	18,23	16,77	6,10	4,73
CP4	5,97	0,50	23,90	1,69	35,85	3,10	47,80	5,17	59,75	13,63	15,11	11,53	8,96	4,10
CP5	5,78	0,84	23,10	2,30	34,66	4,01	46,21	6,28	57,76	10,54	11,86	9,10	7,43	5,36
CP6	7,53	1,04	30,13	3,02	45,20	5,38	60,27	7,99	75,34	13,47	11,41	8,68	7,58	5,45
Mín.	5,78	0,33	23,10	1,59	34,66	2,82	46,21	5,17	57,76	10,54	11,41	8,68	6,10	4,10
Máx.	7,99	1,04	31,96	3,02	47,93	5,38	63,91	8,45	79,89	13,63	19,00	16,77	9,22	5,94
Média	6,76	0,68	27,05	2,12	40,57	3,70	54,09	6,79	67,61	12,85	14,62	11,72	7,86	5,03
DP	0,86	0,27	3,45	0,52	5,17	0,92	6,90	1,21	8,63	1,21	3,36	3,01	1,13	0,67
CV	12,75%	39,88%	12,76%	24,52%	12,75%	24,81%	12,75%	17,88%	12,76%	9,45%	23,00%	25,66%	14,39%	13,36%

Legenda: F_i = Força em relação i da força última. K_i = Módulo de deslizamento entre 10% e uma relação i da força última. v_i = Deslizamento em relação i do deslizamento último. F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Autor.

Tabela A.5 – Resultados individuais do *push-out test* para o grupo D20-X-C.

	$F_{10\%}$	$v_{10\%}$	$F_{40\%}$	$v_{40\%}$	$F_{60\%}$	$v_{60\%}$	$F_{80\%}$	$v_{80\%}$	F_u	v_u	$K_{40\%}$	$K_{60\%}$	$K_{80\%}$	K_u
	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>								
CP1	6,30	0,50	25,23	1,35	37,83	1,94	50,44	2,74	63,05	6,23	22,14	21,89	19,69	9,89
CP2	3,60	0,47	14,38	1,49	21,58	2,11	28,77	2,84	35,96	4,64	10,56	10,97	10,63	7,75
CP3	3,71	0,15	14,86	0,75	22,29	1,50	29,72	2,49	37,15	6,31	18,71	13,84	11,13	5,43
CP4	6,40	0,48	25,59	1,42	38,38	2,18	51,17	2,98	63,97	5,10	20,28	18,80	17,89	12,44
CP5	4,26	0,36	17,04	0,94	25,56	1,58	34,09	2,13	42,61	3,48	21,77	17,45	16,83	12,28
CP6	5,57	0,34	22,30	1,17	33,45	2,12	44,59	3,39	55,74	8,01	20,12	15,71	12,82	6,54
Mín.	3,60	0,15	14,38	0,75	21,58	1,50	28,77	2,13	35,96	3,48	10,56	10,97	10,63	5,43
Máx.	6,40	0,50	25,59	1,49	38,38	2,18	51,17	3,39	63,97	8,01	22,14	21,89	19,69	12,44
Média	4,97	0,38	19,90	1,19	29,85	1,90	39,80	2,76	49,75	5,63	18,93	16,44	14,83	9,06
DP	1,28	0,13	5,11	0,29	7,66	0,30	10,21	0,43	12,77	1,57	4,28	3,83	3,80	2,96
CV	25,64%	34,00%	25,67%	24,54%	25,66%	15,52%	25,66%	15,49%	25,66%	27,93%	22,63%	23,32%	25,65%	32,63%

Legenda: F_i = Força em relação i da força última. K_i = Módulo de deslizamento entre 10% e uma relação i da força última. v_i = Deslizamento em relação i do deslizamento último. F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Autor.

Tabela A.6 – Resultados individuais do *push-out test* para o grupo D20-X-R.

	$F_{10\%}$	$v_{10\%}$	$F_{40\%}$	$v_{40\%}$	$F_{60\%}$	$v_{60\%}$	$F_{80\%}$	$v_{80\%}$	F_u	v_u	$K_{40\%}$	$K_{60\%}$	$K_{80\%}$	K_u
	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>
CP1	7,40	0,35	29,58	1,126	44,37	1,74	59,17	2,75	73,96	6,20	28,51	26,61	21,59	11,38
CP2*	1,48	0,07	5,92	0,231	8,88	0,44	11,83	0,87	14,79	3,03	26,97	19,85	12,90	4,49
CP3	8,17	0,41	32,67	1,045	49,00	1,53	65,34	2,30	81,67	6,00	38,46	36,29	30,25	13,15
CP4	6,16	0,27	24,62	0,920	36,94	1,59	49,25	2,87	61,56	10,39	28,63	23,35	16,61	5,48
CP5	6,86	0,19	27,44	1,199	41,16	2,40	54,87	3,48	68,59	5,96	20,29	15,51	14,59	10,68
CP6	8,64	0,47	34,54	1,247	51,81	1,96	69,07	2,75	86,34	6,59	33,22	29,01	26,50	12,69
Mín.	1,48	0,07	5,92	0,23	8,88	0,44	11,83	0,87	14,79	3,03	20,29	15,51	12,90	4,49
Máx.	8,64	0,47	34,54	1,25	51,81	2,40	69,07	3,48	86,34	10,39	38,46	36,29	30,25	13,15
Média	7,45	0,34	29,77	1,11	44,66	1,84	59,54	2,83	74,42	7,03	29,82	26,16	21,91	10,68
DP	0,99	0,11	3,97	0,13	5,96	0,35	7,94	0,42	9,93	1,89	6,71	7,62	6,56	3,07
CV	13,35%	32,89%	13,34%	11,73%	13,34%	18,98%	13,33%	14,95%	13,34%	26,96%	22,50%	29,14%	29,96%	28,75%

Legenda: F_i = Força em relação i da força última. K_i = Módulo de deslizamento entre 10% e uma relação i da força última. v_i = Deslizamento em relação i do deslizamento último. F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação, em %.

*CP2 excluído da análise estatística por erro na execução do ensaio.

Fonte: Autor.

Tabela A.7 – Resultados individuais do *push-out test* para o grupo D20-PAR-C.

	$F_{10\%}$	$v_{10\%}$	$F_{40\%}$	$v_{40\%}$	$F_{60\%}$	$v_{60\%}$	$F_{80\%}$	$v_{80\%}$	F_u	v_u	$K_{40\%}$	$K_{60\%}$	$K_{80\%}$	K_u
	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>
CP1	8,37	0,89	33,48	1,84	50,23	2,67	66,97	3,84	83,71	14,10	26,37	23,50	19,86	5,70
CP2	9,06	0,39	36,16	3,04	54,29	5,61	72,38	8,93	90,43	15,00	10,21	8,66	7,41	5,57
CP3	9,80	0,36	39,19	2,54	58,80	4,90	78,39	7,65	97,99	14,15	13,43	10,77	9,40	6,40
CP4	7,05	0,51	28,19	2,76	42,29	5,56	56,39	8,93	70,48	15,00	9,39	6,98	5,86	4,38
CP5	9,93	1,17	39,73	2,65	59,59	4,49	79,46	7,15	99,32	14,40	20,16	14,98	11,62	6,76
CP6	7,83	0,69	31,33	3,10	46,99	5,57	62,65	8,17	78,31	13,33	9,74	8,02	7,33	5,58
Mín.	7,05	0,36	28,19	1,84	42,29	2,67	56,39	3,84	70,48	13,33	9,39	6,98	5,86	4,38
Máx.	9,93	1,17	39,73	3,10	59,59	5,61	79,46	8,93	99,32	15,00	26,37	23,50	19,86	6,76
Média	8,67	0,67	34,68	2,66	52,03	4,80	69,37	7,45	86,71	14,33	14,88	12,15	10,25	5,73
DP	1,14	0,32	4,53	0,46	6,81	1,14	9,07	1,90	11,34	0,63	6,93	6,24	5,12	0,82
CV	13,09%	47,47%	13,08%	17,14%	13,08%	23,72%	13,08%	25,54%	13,08%	4,41%	46,59%	51,35%	49,92%	14,34%

Legenda: F_i = Força em relação i da força última. K_i = Módulo de deslizamento entre 10% e uma relação i da força última. v_i = Deslizamento em relação i do deslizamento último. F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Autor.

Tabela A.8 – Resultados individuais do *push-out test* para o grupo D20-PAR-R.

	$F_{10\%}$	$v_{10\%}$	$F_{40\%}$	$v_{40\%}$	$F_{60\%}$	$v_{60\%}$	$F_{80\%}$	$v_{80\%}$	F_u	v_u	$K_{40\%}$	$K_{60\%}$	$K_{80\%}$	K_u
	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>	<i>mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>	<i>kN/mm</i>
CP1	10,72	0,51	42,90	1,73	64,36	3,36	85,80	6,49	107,25	15,00	26,35	18,78	12,55	6,66
CP2	11,11	0,61	44,45	2,28	66,67	4,25	88,91	7,42	111,12	15,00	19,97	15,27	11,44	6,95
CP3	10,75	0,46	42,98	1,86	64,47	3,81	85,97	7,24	107,46	15,00	22,99	16,01	11,08	6,65
CP4	12,13	0,65	48,51	2,73	72,77	5,03	97,03	8,39	121,28	15,00	17,46	13,83	10,96	7,61
CP5	9,06	0,54	36,23	1,96	54,35	4,12	72,46	7,67	90,58	15,00	19,18	12,67	8,90	5,64
CP6	11,49	0,55	45,97	2,59	68,95	4,63	91,93	7,91	114,92	15,00	16,89	14,10	10,94	7,16
Mín.	9,06	0,46	36,23	1,73	54,35	3,36	72,46	6,49	90,58	15,00	16,89	12,67	8,90	5,64
Máx.	12,13	0,65	48,51	2,73	72,77	5,03	97,03	8,39	121,28	15,00	26,35	18,78	12,55	7,61
Média	10,88	0,55	43,51	2,19	65,26	4,20	87,02	7,52	108,77	15,00	20,47	15,11	10,98	6,78
DP	1,04	0,07	4,14	0,41	6,20	0,59	8,27	0,65	10,34	0,00	3,60	2,14	1,19	0,66
CV	9,52%	12,71%	9,51%	18,75%	9,51%	14,06%	9,51%	8,60%	9,51%	0,01%	17,58%	14,17%	10,80%	9,76%

Legenda: F_i = Força em relação i da força última. K_i = Módulo de deslizamento entre 10% e uma relação i da força última. v_i = Deslizamento em relação i do deslizamento último. F_u = Força última. v_u = Deslizamento último. DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação, em %.

Nota: Para todos os corpos de prova da série, F_u foi determinado para $v_u = 15 \text{ mm}$.

Fonte: Autor.