



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

AMANDA CEINOTI DE ALMEIDA

**APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO – GFRP EM
LIGAÇÕES CAVILHADAS PARA CLT**

Londrina
2019

AMANDA CEINOTI DE ALMEIDA

**APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO – GFRP EM
LIGAÇÕES CAVILHADAS PARA CLT**

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Metodologia de Projeto, no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura.

Londrina

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Almeida, Amanda Ceinoti de.

Aplicação de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro – GFRP em ligações cavilhadas para CLT / Amanda Ceinoti de Almeida. - Londrina, 2019. 122 f.

Orientador: Jorge Daniel de Melo Moura .

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2019.

Inclui bibliografia.

1. Cross Laminated Timber - CLT - Tese. 2. Ligações para Cross Laminated Timber - Tese. 3. Cavilhas de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro - GFRP - Tese. 4. Metodologia de Projeto - Tese. I. Moura , Jorge Daniel de Melo . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

AMANDA CEINOTI DE ALMEIDA

**APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM
FIBRAS DE VIDRO – GFRP EM LIGAÇÕES CAVILHADAS PARA CLT**

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Metodologia de Projeto, no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo
Moura
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Ricardo Dias Silva - Universidade
Estadual de Maringá – UEM

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lähr
Universidade de São Paulo – USP

Londrina, 28 de Fevereiro de 2019.



“Dedico esta pesquisa a todos aqueles que buscam o saber e incansavelmente encontram meios para alcançá-lo.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador *Jorge Daniel de Melo Moura* não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, paciência e compartilhamento de conhecimentos.

Aos professores componentes da banca avaliadora, Prof. Dr. *Francisco Antonio Rocco Lähr*, Prof. Dr. *Ricardo Dias Silva* e Prof. Dr. *César Imai*, pelas considerações e contribuições nesta pesquisa.

A Fundação Araucária e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - pela concessão das bolsas de estudos, viabilizando minha permanência em Londrina e a dedicação exclusiva para esta pesquisa.

Aos professores do Programa Associado UEM/UEL de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPU) pelo conteúdo ministrado com carinho nas aulas das disciplinas e aos amigos adquiridos durante esse trajeto, em especial à *Laisa Rebeca do Vale Barcarolo*, pelos compartilhamentos de busca e conhecimento.

Ao *Carlo Alberto Duarte* e ao *Luís Gustavo Patrocino*, técnicos da Maquetaria e Laboratório de Estruturas da Universidade Estadual de Londrina – UEL, pela dedicação e orientação nos procedimentos dos ensaios.

Ao *Fábio* da empresa Compensados Ideal Ltda. por gentilmente ter cedido o espaço para colagem dos painéis, a equipe e o adesivo.

Ao Prof. Dr. *Altibano Junior Ortenzi* pela orientação a respeito dos Materiais Compósitos e as ferramentas de Modelagem Paramétrica Computacional, além da paciência nas explicações dos conceitos.

A minha querida e maravilhosa família: *Leonor, Adenildo, Rafael e Daniel*, pela compreensão, afeto, carinho e constante apoio nesta etapa de evolução dos meus conhecimentos. *Amo vocês.*

Ao meu amor *Madison Francis Molossi*, primeiramente pela paciência em escutar todos os momentos de desespero e dúvidas, mas principalmente pelo seu amor e todas as forças concedidas. *Você é essencial e insubstituível.*

*“Embora possua este universo, nada possuo,
pois não posso conhecer o desconhecido, se
ao conhecido me agarro”*

(O cavaleiro preso na armadura – Robert Fisher)

*“C’è una forza motrice più forte del vapore,
dell’elettricità e dell’energia atomica: la volontà”*

Albert Einstein

ALMEIDA, Amanda Ceinoti de. **Aplicação de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro – GFRP em ligações cavilhadas para CLT**. 122 f. Dissertação (Mestrado Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

RESUMO

A difusão do *Cross Laminated Timber* - CLT na construção civil tem sido evidenciada pelas qualidades e benefícios desse material. Desta maneira, o seu desempenho é de grande interesse no cenário mundial. As ligações entre os painéis são de suma importância dado que, a transmissão de esforços se dá por meio delas. Comumente, os painéis são conectados por pregos e parafusos e apesar de existirem diversas pesquisas sobre o assunto, ainda há muitas lacunas a serem preenchidas. A proposta desta pesquisa é realizar ligações entre painéis de CLT com cavilhas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro – GFRP. Os materiais compósitos são constituídos por duas partes, a matriz e o reforço. Do conjunto das partes, origina-se a nomenclatura do material, como os Poliméricos (matriz) Reforçados com Fibras de Vidro - GFRP. Nos setores industrial, aeroespacial e automobilístico os GFRP são amplamente empregados. Na construção civil, o seu uso ainda é tímido, sendo aplicado como reforço ou recuperação de estruturas. Entretanto, esse material tem alto potencial. Sendo assim, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento estrutural das ligações cavilhadas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro – GFRP entre painéis de CLT. Para alcançar tal objetivo, os métodos utilizados são a modelagem paramétrica computacional – análise por elementos finitos – e os ensaios laboratoriais. Os experimentos consistiram em duas partes: a primeira foi a caracterização das propriedades mecânicas das cavilhas de GFRP e a segunda foi o ensaio das ligações de GFRP entre painéis de CLT com duas configurações de junta e posicionamento das ligações em relação ao plano – *half-lap* à 90° e extremidade/ 45°. Através dos resultados obtidos na caracterização das cavilhas, foi possível identificar algumas propriedades mecânicas. Os valores adquiridos por meio dos ensaios das ligações cavilhadas para CLT apresentaram ótimo desempenho estrutural para as ligações *half-lap*, sendo a capacidade resistente maior que a de pregos e parafusos. Para as ligações de extremidades, a angulação prejudica o desempenho da fibra de vidro, resultando em desempenho inferior a de parafusos e em relação ao prego, a capacidade resistente foi maior e rigidez menor.

Palavras-chave: *Cross Laminated Timber* - CLT. Ligações para CLT. Cavilhas de GFRP. Comportamento estrutural. Metodologia de Projeto.

ALMEIDA, Amanda Ceinoti de. **Application of Polimeric composites reinforced with with fiberglass- GFRP in dowel connections for CLT.** 122 pp Dissertation (Masters Architecture and Urbanism) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

ABSTRACT

The growth of Cross Laminated Timber – CLT in construction has been evidenced by the qualities and benefits of this material. Thus, the performance of this structure is of great interest in the world scenery. The connections among the panels are of high importance given that the transmission of efforts is through them. Commonly, the panels are connected through nails and screws and in spite of several researches existing on this subject, there are still a lot of gaps to be filled out. The proposal of this research is study CLT panel connections with Glass Fiber-Reinforced Polymer-GFRP dowels. The composite materials are constituted by two parts, the matrix and the reinforcement. Hence the nomenclature of the material, as follows Glass Fiber-Reinforced Polymer (matrix). In the industrial, aerospace and automobile sectors the GFRP is largely employed. In the construction, its use is still low, being applied as reinforcement or recovery of structures. However, this material has high potential. Therefore, the objective of this study is to analyze the Glass Fiber-Reinforced Polymer-GFRP dowel connections between CLT panels. To reach such objective, the methods are: parametric computational modelling - analysis by finite elements - and the experimental tests. The parametric computational modelling, narrows down the possibilities of the experimental investigation. The experiments consisted of two parts: the first was the characterization of the mechanical properties of the GFRP pins and the second was the test of GFRP connections between CLT panels with two joint configurations and positioning of the connections in relation to the plane - half-lap / at 90 ° and end / 45.

Key words: Cross Laminated Timber. CLT connections. GFRP dowel connections. Structural behavior. Design methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição do painel de Cross Laminated Timber (CLT).	21
Figura 2: Projeto do Oakwood Tower – Londres – UK.	22
Figura 3: Possibilidade de ligação entre painéis de CLT.	23
Figura 4: Juntas de ligações entre painéis de CLT.	23
Figura 5: Quatro tipos de conectores metálicos e parafusos de fixação.	26
Figura 6: Possibilidade de configurações de ligações entre painéis de CLT.	27
Figura 7: Configurações 9,10, 19, modelo de teste para paredes adjacentes, medidas em milímetros.	29
Figura 8: Configuração dos corpos de provas (dimensões em milímetros).	30
Figura 9: Configurações de teste avaliadas por Richardson, 2015.	30
Figura 10: Força atuante nos blocos em cisalhamento nos testes monotônico e cíclico	31
Figura 11: Conexões comumente utilizadas em CLT (a) e (b) e conexão testada (c) e locação dos parafusos (d) e (e).	32
Figura 12: Configuração do corpo de prova com ligações de parafusos STS.	33
Figura 13: Classificação dos vários tipos de compósitos.	34
Figura 14: Processos da técnica de pultrusão.	39
Figura 15: Configuração do quadro de concreto com reforço de painéis de CLT (a). Injeção de adesivo epóxi entre painéis de CLT.	41
Figura 16: Gráficos da EN 26891: (a) programa de carga e (b) gráfico resultante.	45
Figura 17: Diagrama de Carregamento determinado pela NBR 7190.	46
Figura 18: Modelo para confecção da amostra de compósitos poliméricos reforçados (medidas em mm).	46
Figura 19: Modos de ruptura – um plano de corte (a) e dois planos de corte (b).	50
Figura 20: Etapas da modelagem paramétrica dividida por software.	58
Figura 21: Modelagem do painel de CLT.	59
Figura 22: Painéis CLT com adesivo MUF e recorte das juntas.	59
Figura 23: Modelagem do polímero, fibra e montagem da cavilha	61
Figura 24: Montagem dos Painéis CLT conectados com cavilhas de GFRP.	62
Figura 25: Criação de materiais no SolidWorks.	62
Figura 26: Área de trabalho no ANSYS.	63

Figura 27: Malha e Condições de contorno. _____	64
Figura 28: Primeira e segunda tentativa de confecção da cavilha de GFRP. _____	66
Figura 29: Impregnação da resina na fibra. _____	66
Figura 30: Quarta tentativa de confecção da cavilha de GFRP. _____	66
Figura 31: Corpos de prova desenformados. _____	67
Figura 32: Corpo de prova na parte inferior da EMIC (a). Cisalhamento do corpo de prova na área do mordente. _____	67
Figura 33: Corpo de prova na parte superior: escorregamento nos mordentes. _____	68
Figura 34: Cavilha usinada no volume central. _____	68
Figura 35: Detalhes da usinagem do corpo de prova. _____	68
Figura 36: Ruptura do corpo de prova usinado. _____	69
Figura 37: Corpos de prova com extremidades engrossadas. _____	69
Figura 38: Readaptação da confecção das cavilhas. _____	70
Figura 39: Corpos de prova para testes preliminares 1 – T1. _____	70
Figura 40: Modo de Ruptura das cavilhas de GFRP. _____	71
Figura 41: Dimensões das configurações ajustadas segundo a ASTM D 638. _____	72
Figura 42: Corpo de prova desenformado com excesso de material. _____	73
Figura 43: Corpos de prova selecionados para ensaio final de caracterização das cavilhas de GFRP. _____	73
Figura 44: Procedimento de colagem dos extensômetros, fixação dos fios e teste com multímetro digital. _____	74
Figura 45: Ensaio de caracterização das cavilhas de GFRP. _____	74
Figura 46: Configurações para os testes experimentais. (1) Half-lap, ligação a 90°, (2) Extremidade, ligação 45°. _____	75
Figura 47: Painéis com junta half-lap. _____	77
Figura 48: Processo de confecção das cavilhas para ensaio de ligação. _____	78
Figura 49: Cavilhas para o ensaio de ligações entre painéis de CLT. _____	79
Figura 50: Teste de pré-furação das cavilhas de GFRP. _____	79
Figura 51: Suporte para pré-furação dos painéis de CLT. _____	80
Figura 52: Gabarito e pré-furação da junta half-lap. _____	80
Figura 53: Processo de preparação das cavilhas para inserção nos furos dos painéis. _____	81
Figura 54: Inserção da cavilha no pré-furo dos painéis. _____	81
Figura 55: Recorte dos volumes das cavilhas. _____	82

Figura 56: Corpo de prova com junta half-lap. _____	82
Figura 57: Processo de pré-furação do corpo de prova da junta de extremidade. _	83
Figura 58: Inserção das cavilhas no corpo de prova com junta de extremidade. __	83
Figura 59: Corpos de prova concluídos. _____	84
Figura 60: Hastes de apoio para ensaio dos painéis. _____	84
Figura 61: Corpo de prova gêmeo posicionado_____	85
Figura 62: Abertura lateral dos painéis no ensaio. _____	86
Figura 63: Configuração do ensaio adaptações. _____	86
Figura 64: Configuração do ensaio das juntas half-lap. _____	87
Figura 65: Gráfico de tensão-deformação média longitudinal. _____	88
Figura 66: Gráfico de tensão-deformação média transversal. _____	89
Figura 67: Resultado da Modelagem Parasólida Computacional. _____	92
Figura 68: Curva de força-deslocamento resultante do ensaio das ligações _____	93
Figura 69: Força máxima obtida no ensaio das ligações _____	95
Figura 70: Diagrama do Módulo de elasticidade e Resistência do GFRP. _____	96
Figura 71: Cisalhamento das ligações posterior aos ensaios. _____	97
Figura 72: Angulação dos pregos x ângulos das ligações para ligações de extremidade. _____	99
Figura 73: Peças de madeira classificadas, cortadas e agrupadas. _____	113
Figura 74: Aplicação de adesivo para colagem das camadas dos painéis CLT. __	113
Figura 75: Painéis colados e preparados para esquadrejamento. _____	113
Figura 76: Esquadrejamento dos painéis. _____	114
Figura 77: Painéis de CLT concluídos. _____	114
Figura 78: Espaçamentos mínimos entre ligações com pinos_____	116
Figura 79: Espaçamentos e distâncias mínimas de ligações com pregos, parafusos e cavilhas. _____	116
Figura 80: Diagrama de força x deformação para determinação da resistência da ligação. _____	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: 12 Configurações testadas no programa experimental de ligações de CLT.	28
Tabela 2: Classificação das fibras de vidro, principais características e resistências mecânica e química.	37
Tabela 3: Propriedades mecânicas dos Compósitos Poliméricos Reforçados com fibras de Vidro e Carbono	38
Tabela 4: Configurações e dimensões dos corpos de prova encontrados na literatura.	48
Tabela 5: Propriedades dos materiais da modelagem.	63
Tabela 6: Agrupamento dos painéis para formação dos corpos de prova.	78
Tabela 7: Comparativo de cálculos teóricos com o ensaio das cavilhas	90
Tabela 8: Resistência à tração média dos ensaios das cavilhas.	91
Tabela 9: Resultados obtidos para as ligações de extremidade	94
Tabela 10: Resultados obtidos para as ligações half-lap.	95
Tabela 11: Comparativo do Módulo de deslizamento instantâneo das duas configurações.	97
Tabela 12: Comparação dos resultados do ensaio com os da literatura (cavilhas x parafusos).	98
Tabela 13: Comparação dos resultados do ensaio com os de Branco (2003) (cavilhas x pregos).	99
Tabela 14: Resultados obtidos na Modelagem Paramétrica x Ensaíados – junta half-lap.	100
Tabela 15: Pesos e medidas Cavilhas de GFRP – Teste Preliminar 1 e Teste Preliminar 2.	110
Tabela 16: Pesos e medidas Cavilhas de GFRP – Ensaio Final.	111
Tabela 17: Módulo de Elasticidade Estático Médio dos painéis CLT confeccionados.	112
Tabela 18: Peso das cavilhas de GFRP para ensaio das ligações entre painéis de CLT.	115
Tabela 19: Espaçamentos e distâncias mínimas, dependente do ângulo da ligação.	117
Tabela 20: Propriedades dos materiais: Resina, Endurecedor e Fibra de Vidro	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAP – Peróxido e Acetil Acetona

ANSI/APA – *American National Standards Institute/ The Engineered Wood Association*

ANSYS – *Analysis Systems Incorporated*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BPO – Peróxido de Benzoíla

CAE – *Computer Aided Engineering*

CNR/IVALSA – *Consiglio Nazionale delle Ricerche/ Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree*

COUNCIL – *Council on Tall Buildings and Urban Habitats*

CFRP – *Carbon Fiber-Reinforced Polymer*

CLT – *Cross Laminated Timber*

GFRP – *Glass Fiber-Reinforced Polymer*

LVL – *Laminated Veneer Lumber*

MEF – Método de Elementos Finitos

MEKP – Peróxido de Metil Etil Cetona

MLC – Madeira Laminada Colada

MUF – Melanina-ureia-formaldeído

NBR – Associação Brasileira de Normas Técnicas

PDS – *Probabilistic Design System*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	20
2.1.1 O Papel das Ligações em Estruturas de Madeira	24
2.1.1.1 Categorias de Ligações: Cavilhas, Pregos e Parafusos	25
2.1.2 Estudos de Ligações entre painéis de CLT	26
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS	33
2.2.1 Fase Matriz: Polímeros	34
2.2.1.1 Resinas epóxis	35
2.2.1.2 O processo de cura dos polímeros	35
2.2.2 Fase Dispersa: A fibra de vidro	36
2.2.3 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras	37
2.2.3.1 Processo de produção dos polímeros reforçados com fibras	39
2.2.4 Estruturas de madeira reforçadas com compósitos	40
2.3 METODOLOGIAS DE ENSAIO ENCONTRADOS NA LITERATURA	42
2.3.1 Método de Modelagem Paramétrica Computacional	42
2.3.2 Método Experimental – Ensaios	44
2.3.2.1 Tipos de Carregamentos	44
2.3.2.2 Ensaios – Norma Europeia x Norma Brasileira	45
2.3.2.3 Ensaio – ASTM D 638	46
2.4 CONFIGURAÇÕES DOS PAINÉIS CLT, CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES	47
2.4.1 Dimensões do corpo de prova e Configurações – Painéis de CLT	47
2.4.2 Ligações em Estruturas de Madeira	49
2.4.2.1 Dimensionamento das Ligações	49
2.4.2.2 Resistência ao Esmagamento Localizado da Madeira	50
2.4.2.3 Capacidade de Resistência e Plastificação da Ligação	50
2.4.2.4 Rigidez das Ligações	51
2.4.3 Critérios de Cálculo de GFRP	51
2.4.3.1 Comportamento Elástico, Resistência à Tração e Cisalhamento	52
2.5 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	55

3 MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1 MODELAGEM PARAMÉTRICA COMPUTACIONAL	58
3.1.1 Procedimentos no Software Solidworks	58
3.1.2 Procedimentos no Software ANSYS	63
3.2 PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS FÍSICOS	64
3.2.1 Confeção das Cavilhas de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro – GFRP para Caracterização Mecânica e Ensaio	64
3.2.2 Elaboração dos Painéis de CLT	75
3.2.3 Elaboração dos Corpos de Prova	77
3.3 ENSAIOS MECÂNICOS – LIGAÇÕES DOS PAINÉIS CLT	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CAVILHAS DE GFRP	88
4.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA COMPUTACIONAL	92
4.3 ENSAIO DE LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS CLT COM CAVILHAS DE GFRP	92
5 CONCLUSÕES	102
6 POSSIBILIDADES DE FUTUROS ESTUDOS	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICE I – CONFECÇÕES DE Cavilhas de GFRP – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	110
APÊNDICE II – PROCEDIMENTOS DE CONFECÇÃO DO CLT	112
APÊNDICE III – CONFECÇÃO DAS CAVILHAS PARA ENSAIO DAS LIGAÇÕES – CLT	115
ANEXO I – DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES	116
ANEXO II – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS: RESINA, ENDURECEDOR E FIBRA DE VIDRO	122

1

INTRODUÇÃO

Os sistemas construtivos inovadores ou aperfeiçoamentos dos existentes são destaque no cenário mundial, especialmente, as estruturas de madeira proveniente de reflorestamento. A justificativa para tal ênfase, são as temáticas debatidas em todas as esferas: desenvolvimento tecnológico, inovação e sustentabilidade.

Nesse contexto, o sistema construtivo *Cross Laminated Timber* (CLT) ou Madeira Laminada Colada Cruzada é aplicado em diversos projetos atualmente. A técnica construtiva é constituída por lâminas de madeira serrada e coladas em camadas perpendiculares, que origina um painel estrutural de madeira maciça.

Diante disso, estudos mais aprofundados sobre as questões de desempenho desta estrutura são realizados mundialmente. O desempenho das ligações é um dos quesitos analisados, visto que são nelas que se encontra o ponto crítico e de maior falha estrutural entre os elementos da madeira. De acordo com Pfeil e Pfeil (2008), os principais tipos de ligações empregadas são: colagem, pregos, grampos, braçadeiras, pinos, parafusos, conectores metálicos, tarugos e entalhes.

Em CLT, as ligações normalmente são feitas por pinos, parafusos e conectores metálicos, entretanto como essa tecnologia construtiva é relativamente nova e está em crescente difusão, existem diversos estudos sobre o assunto, como: Popovski; Schneider e Schweinsteiger (2010), Fragiacom, Dujic e Sustersic (2011), Branco; Kekeliak e Lourenço (2015), Hossain; Danzing e Tannert (2016), entre outros.

O objetivo dos estudos é a avaliação do desempenho das ligações, principalmente, para áreas que sofrem abalos sísmicos. Desse modo, há potencial para estudos de ligações alternativas para o sistema construtivo CLT, com outros materiais não convencionais, como: os compósitos.

Esse material está inserido na indústria aeronáutica desde a década de 1960 e já originou novas oportunidades de desenvolvimento de estruturas com alto desempenho e baixo peso. Sua aplicação se expande também para o setor da construção civil, tais como, reparos e adequações de pontes (REZENDE; BOTELHO, 2000).

Em estruturas de madeira, esse material é aplicado como reforço ou reabilitação dos elementos. Os compósitos mais empregados para essa finalidade são: os compósitos de polímeros reforçados com fibra de vidro (*Glass Fiber-Reinforced Polymer – GFRP*) e os de polímeros reforçados com fibras de carbono (*Carbon Fiber-Reinforced Polymer – CFRP*), sendo que, os GFRP têm características mecânicas similares aos CFRP, entretanto o custo do primeiro é relativamente menor, que o do segundo.

Sendo assim, o propósito desta pesquisa foi analisar o desempenho estrutural das ligações cavilhadas confeccionadas em GFRP, entre painéis de CLT. O problema a ser investigado era o desempenho estrutural das ligações entre painéis de CLT com cavilhas de GFRP. Portanto, a principal questão a ser respondida foi: Qual é o desempenho estrutural das ligações entre painéis de CLT com cavilhas de GFRP?

Apesar do desenvolvimento de várias técnicas de ligações em madeira, ainda existem muitas lacunas na caracterização do comportamento das mesmas (BRANCO, 2003), além disso a alternativa de outras ligações para um sistema construtivo com maior eficiência estrutural facilita o processo de industrialização e execução, justificando, portanto, a pesquisa.

A metodologia de pesquisa foi dividida em duas partes. A primeira foi a realização de uma modelagem parasólida e a análise por elementos finitos computacional - por meio dos *softwares SolidWorks* e *ANSYS* - das ligações entre painéis de CLT com cavilhas de GFRP. A finalidade da modelagem parasólida era encontrar resultados prévios, diminuir as possibilidades, os contratempos e economizar materiais, na próxima etapa.

A segunda parte, foram os experimentos laboratoriais, etapa na qual as cavilhas de GFRP foram caracterizadas mecanicamente e, posteriormente conectaram os painéis para a análise de desempenho estrutural enquanto ligação. Os resultados obtidos nas duas etapas metodológicas, foram comparadas aos resultados das ligações entre painéis de CLT com pregos e parafusos encontrados na literatura.

Além disso, cabe ressaltar a originalidade desta pesquisa, visto que até o presente momento, não foi encontrada na literatura estudos iguais ou similares. Com caráter exploratório, este estudo avançou em um nível mais aprofundado de conhecimento científico.

Objetivo Geral:

- Analisar o comportamento estrutural das ligações cavilhadas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro – GFRP entre painéis de CLT.

Objetivos específicos:

- Compreender o desempenho mecânico de cavilhas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro – GFRP;
 - Simular por meio da modelagem paramétrica computacional, o desempenho estrutural das ligações entre painéis de CLT com cavilhas de GFRP.
-

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Nas últimas décadas a palavra de grande destaque em diversos discursos é sustentabilidade. A preocupação do homem diante dos efeitos nocivos para o planeta, gerados pelos seus próprios atos, é pauta em todas as áreas.

A construção civil está entre os setores de grande influência na emissão de gases de efeito estufa, correspondendo a um terço do total mundial (UNEP, 2007). As emissões nesse setor estão associadas a extração das matérias-primas dos materiais, nas etapas de fabricação desses materiais, na construção, uso e operação do edifício, o descarte final dos resíduos após a vida útil da edificação e o transporte efetuado durante todo o processo (BESSA, 2010).

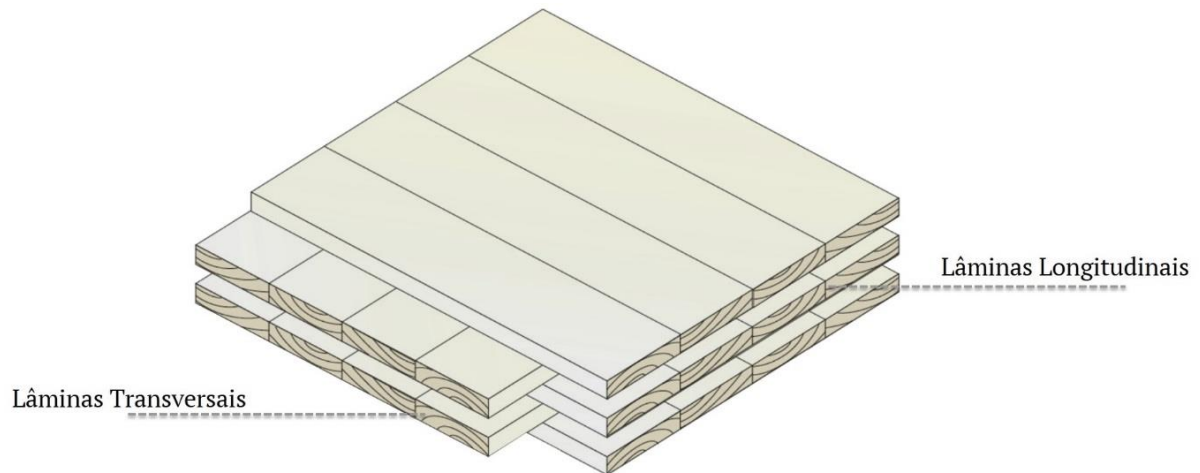
A matéria-prima, de acordo com Metz et al. (2007 apud BESSA, 2010), depende energia de produção para ser incorporada na construção de edifícios e deve-se substituir materiais como o concreto e aço – que requerem quantidade significativa de energia – por materiais que solicitam menor quantidade de energia, por exemplo: os produtos originados da madeira.

Nesse contexto, a madeira é matéria-prima de diversos sistemas construtivos, uma vez que esse material procede de florestas plantadas, principalmente pelas propriedades de sequestro do CO₂ da atmosfera. Pode-se citar alguns materiais nessas condições, como: a Madeira Laminada Colada - MLC, *Laminated Veneer Lumber* – LVL, *Cross Laminated Timber*, entre outros.

O sistema construtivo *Cross Laminated Timber* (CLT) ou Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), se constitui por lâminas de madeira, coladas em camadas

transversais, formando um painel de madeira maciça, com propriedades estruturais (Figura 1). Os painéis devem ter camadas ímpares, variando em no mínimo 3 e no máximo 9 lâminas de madeira.

Figura 1: Composição do painel de *Cross Laminated Timber* (CLT).



Fonte: Adaptado de FPIInnovations, 2011.

O CLT surgiu em meados dos anos de 1990, na Áustria e Alemanha, de uma parceria entre uma indústria e a pesquisa da *Graz University of Technology*. A inserção do sistema construtivo na construção foi lenta e nos anos 2000 teve aumento significativo (FPINNOVATIONS, 2011).

Brandner (2013) afirma que o CLT tem potencial para o ressurgimento de construções em madeira e pode ser visto em edifícios de vários pavimentos: comerciais e residenciais, assim como é concorrente direto de materiais com bases minerais (concreto armado e alvenaria).

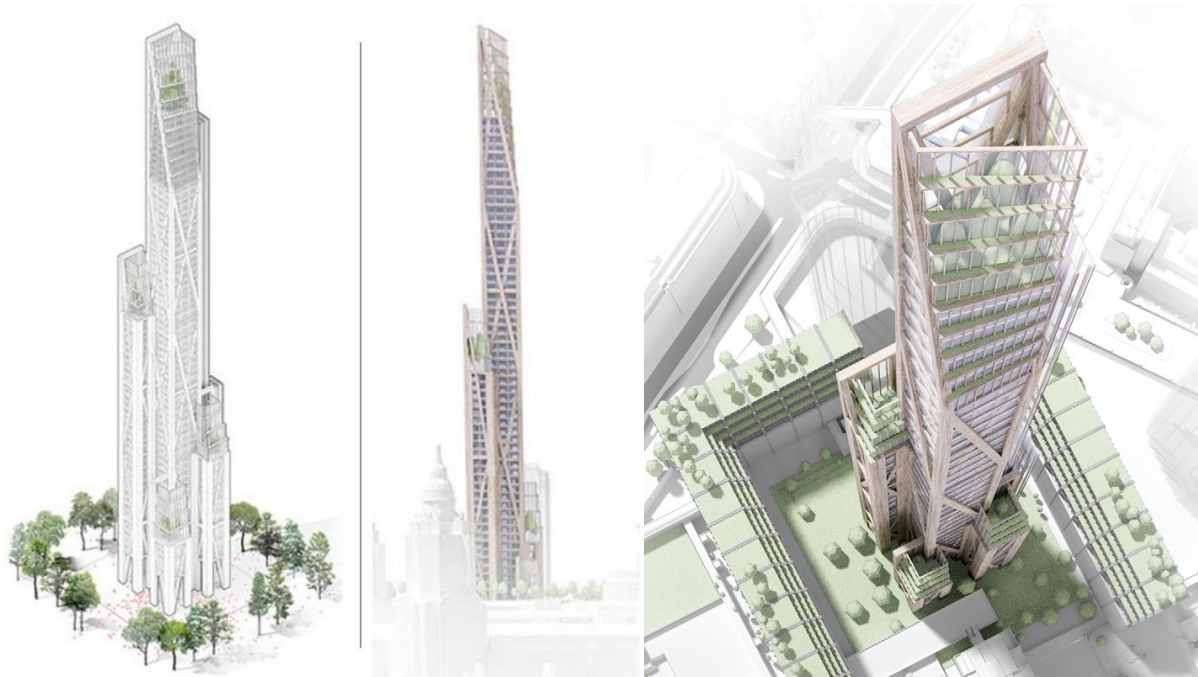
Além disso, esse sistema construtivo é selecionado devido as suas propriedades estruturais, o bom comportamento em situações de incêndios, ao desempenho térmico, acústico e ambiental e por ser um material massivo no sequestro de CO₂ (MOHAMMAD et al., 2012).

Como exemplificação de implantação desse sistema, pode-se aludir ao projeto do *Oakwood Tower* (Figura 2), um edifício de 80 pavimentos para uma área central de Londres-UK, composto por estruturas de madeira, entre elas o CLT.

O projeto do *Oakwood Tower* surgiu na Universidade de Cambridge, que buscava, por meio da pesquisa nomeada *Super Tall Timber* - com a parceria da *PLP*

Architecture e os engenheiros Smith e Wallwork – o objetivo de elaborar uma proposta do primeiro edifício em madeira com no mínimo 300 metros de altura, para ser considerado um *Super Tall* na classificação do *Council on Tall Buildings and Urban Habitats* (CTBUH, 2016) (RAMAGE et al., 2017) e (FOSTER; RAMAGE, 2016).

Figura 2: Projeto do *Oakwood Tower* – Londres – UK.



Fonte: PLP ARCHITECTURE, 2018.

O projeto foi apresentado ao prefeito *Boris Johnson*, ao público e aos incorporadores. Ele resultou uma reação de expectativa com relação a edifícios altos executados com estrutura de madeira (RAMAGE et al., 2017) e (FOSTER; RAMAGE, 2016).

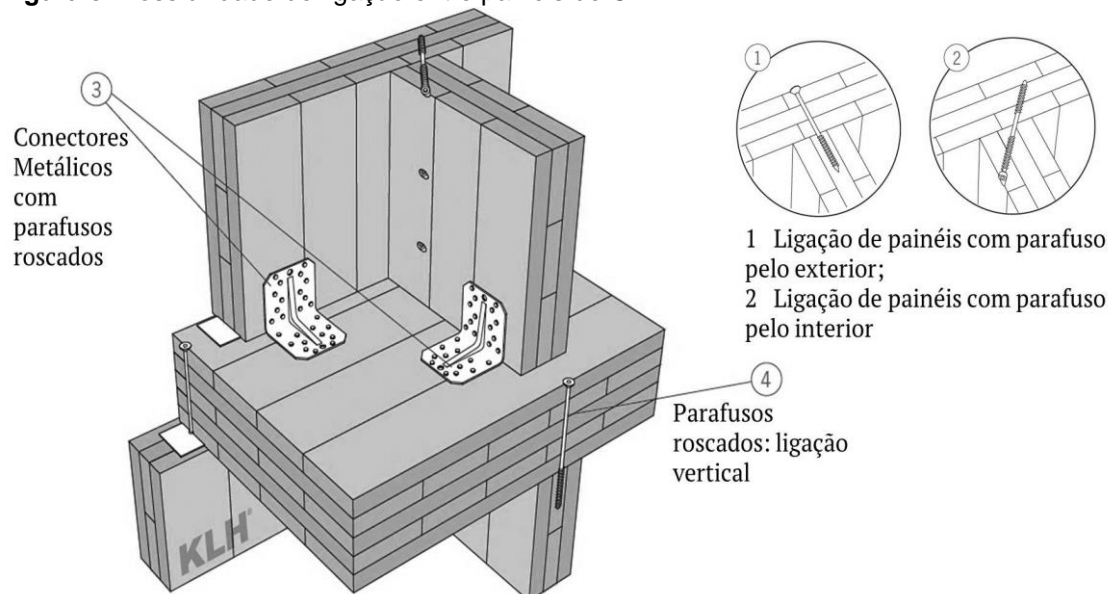
A escolha do CLT, para a proposta do *Oakwood Tower*, é fundamentada pela sustentabilidade e a homogeneização que ocorre com a laminação cruzada das tábuas, em que se observa a diminuição da variabilidade da madeira bruta, com o balanceamento dos defeitos da estrutura anatômica do material (RAMAGE et al., 2017).

Há também, outros exemplos de edifícios construídos com o CLT em vários países: na Inglaterra, o *Stadthaus* com 9 pavimentos e o *Bridport* com 8 pavimentos; na Itália, o *Via Cenni* com 9 pavimentos; na Alemanha, o *Esmarchstrasse* com 7

pavimentos; na Noruega, o *Svartlamoen* com 6 pavimentos; na Áustria, o *Muhlweg Project* com 3 pavimentos e na Suíça, o *Steinhausen* com 6 pavimentos.

Ainda que, o surgimento do CLT date a década de 1990, essa tecnologia ainda se encontra em difusão, possibilitando o aprimoramento do sistema. De acordo com Espinoza et al. (2016), as investigações mais urgentes sobre esta temática são o desempenho estrutural, desempenho face a variação de umidade e as ligações dos painéis.

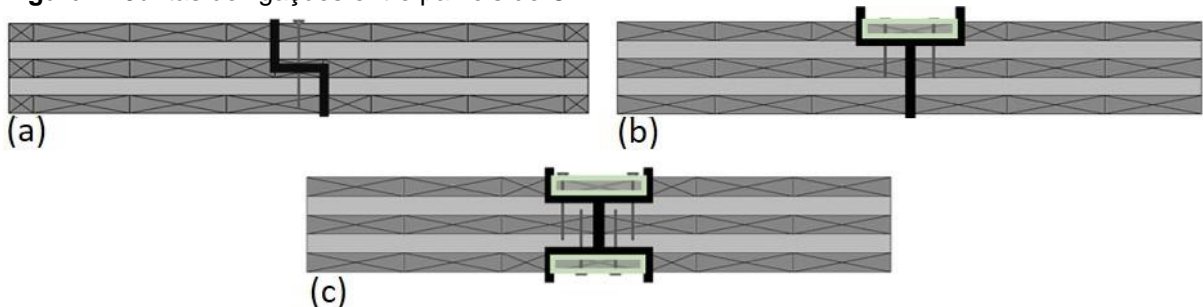
Figura 3: Possibilidade de ligação entre painéis de CLT.



Fonte: Adaptado de KLH MASSIVHOLZ GmbH, 2011.

As ligações em CLT são comumente realizadas com pregos, parafusos e conectores metálicos, conforme exemplificado na figura 3. Os painéis parede são fixados por conectores ao painel laje-piso, enquanto as ligações entre as paredes são feitas por parafusos roscados.

Figura 4: Juntas de ligações entre painéis de CLT.



Fonte: Adaptado de FPIinnovations, 2011.

Os encaixes entre dois painéis são feitos por três tipos de juntas mais recorrentes, conforme o esboço na figura 4: as *half-lap* (a), as *splines* – simples (c), uma lâmina de compensando *Laminated Veneer Lumber* (LVL) são fixadas em uma face por parafusos, realizando a conexão entre os painéis e, dupla (b), duas lâminas de LVL são fixadas nas duas faces por parafusos.

2.1.1 O Papel das Ligações em Estruturas de Madeira

Com o propósito de melhor compreensão sobre a importância de estudos e aprofundamentos das ligações entre painéis de CLT, este tópico apresenta sucintamente o papel das ligações em estruturas de madeira.

Os elementos de madeira, devido às funções anatômicas do material e das limitações de comprimento, particularmente a madeira serrada, necessitam de ligações para compor elementos estruturais (SZUCS et al., 2015).

As ligações entre os elementos de madeira são o ponto mais crítico e de maior incidência de falhas. No ano de 1984 já se estimava que 80% dos problemas dessas estruturas, se iniciam nas ligações (ITANY; FAHERTY, 1984).

A concepção de ligações deficientes podem comprometer a estabilidade da estrutura e originar diversas patologias, assim como influenciam o comportamento do conjunto com relação à durabilidade, aos estados limite últimos e a resistência ao fogo (BRANCO,2003).

O estado limite, segundo Szucs et al. (2015, p. 50), é um método de verificação da segurança estrutural, ou seja, “é a capacidade que a estrutura apresenta de suportar as diversas ações que vierem a solicitá-la durante a sua vida útil, sem atingir qualquer estado limite”, os estados limites últimos, especificamente, “são aqueles correspondentes ao esgotamento da capacidade portante da estrutura”.

Em vista disso, as ligações têm papel fundamental nas estruturas de madeira e de acordo com Branco (2003), mesmo com o desenvolvimento de diversas técnicas de ligação, ainda há muitas lacunas na descrição do comportamento das mesmas.

As características e definições estruturais das ligações são determinadas de acordo com os dispositivos empregados. Segundo Pfeil e Pfeil (2008), elas podem ser feitas por: colagem, pregos, grampos, braçadeiras, pinos, parafusos, conectores

metálicos, tarugos e entalhes, e cada tipo de ligação deve ser dimensionada de acordo com as normas para assegurar um bom desempenho estrutural.

2.1.1.1 Categorias de Ligações: Cavilhas, Pregos e Parafusos

Entre os dispositivos de ligações apresentados, as cavilhas são um tipo de pino. Segundo Branco (2003), o termo cavilha é generalizado para designar: pregos, parafusos de porca, parafusos autorroscantes, pinos e cavilhas de madeira propriamente ditas. Esses elementos de ligações têm formatos cilíndricos e são instalados entre as peças de madeira, o diâmetro do furo deve ser menor ou igual ao diâmetro do dispositivo (PFEIL; PFEIL, 2008).

Os pregos e parafusos, de acordo com Pfeil e Pfeil (2008), devido ao comportamento semelhante, são englobados na categoria de ligações com pinos metálicos. Branco (2003) afirma que as principais vantagens dos pregos para ligar peças de madeira são a simplicidade e a facilidade de aplicação desse elemento e funcionam ao corte.

Os parafusos são classificados segundo Pfeil e Pfeil (2008) em dois tipos:

- Parafusos rosqueados autoatarraxantes – não são aceitos pela NBR 7190 como ligações estruturais em madeira, mas são considerados pela norma europeia EUROCODE 5 e americana NDS. Normalmente, trabalham a corte simples, podem ser aplicados na direção das fibras para transmissão de esforços, entretanto são muito sensíveis a umidade sobre a madeira.
- Parafusos com porcas e arruelas – são locados em furos e posteriormente as porcas são apertadas, comprimindo a madeira na direção transversal e os esforços são transferidos à madeira com o auxílio de arruelas.

Destarte, para cada tipo de elemento de ligação empregado nas estruturas de madeira, é fundamental o dimensionamento dos furos, espaçamento e diâmetro dos mesmos. Os cálculos de dimensões devem ser feitos de acordo com as normas e dependem do tipo de estrutura a serem empregadas as ligações.

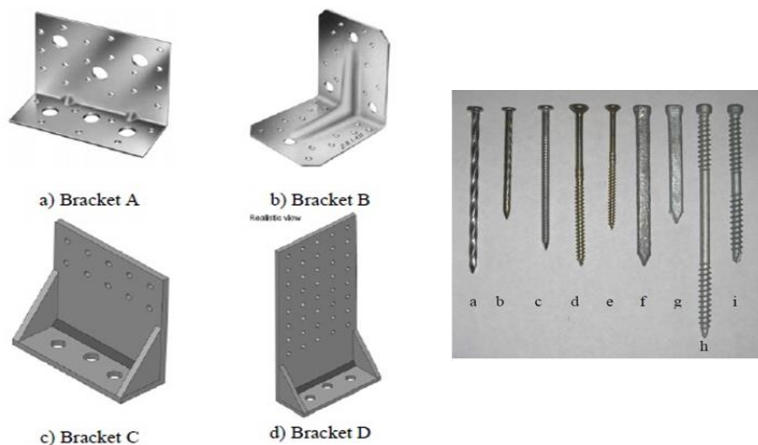
2.1.2 Estudos de Ligações entre painéis de CLT

A disseminação do CLT na construção civil nas últimas décadas, tem estimulado pesquisadores a estudar as ligações desse sistema. Alguns dos estudos serão apresentados a seguir, para fins de compreensão dos principais quesitos investigados.

No ano de 2010, Popovski, Schneider e Schweinsteiger realizaram 32 testes monotônicos e cíclicos (nesse caso, para abalos sísmicos), a fim de analisar o comportamento dos conectores em painéis paredes. Os painéis foram compostos por 3 camadas, com 94mm de espessura de madeira Abeto europeu. Como o estudo foi efetuado em Vancouver e os painéis confeccionados pela *KLH Massiveholz GmbH* na Áustria, a definição das dimensões dos painéis ficou atrelada ao invólucro de transporte, limitada a 2,3m x 2,3m.

Ao todo 12 configurações diferentes foram testadas, para 3 tipos de relação: 1:1 (2,3m x 2,3m), 1:1,5 (2,3m de altura e 3,45m de comprimento) e 2.1:1 (4,9m de altura e 2,3m de comprimento) parede com pé direito de 2 pavimentos.

Figura 5: Quatro tipos de conectores metálicos e parafusos de fixação.



Fonte: POPOVSKI; SCHNEIDER; SCHWEINSTEIGER, 2010.

As ligações tiveram quatro tipos de conectores (figura 5), que fixavam os painéis parede à fundação de aço, com pregos e parafusos (figura 5). Nas conexões entre dois painéis paredes, também foram empregados parafusos e pregos, e o teste consistiu em verificar o desempenho estrutural sob cargas laterais.

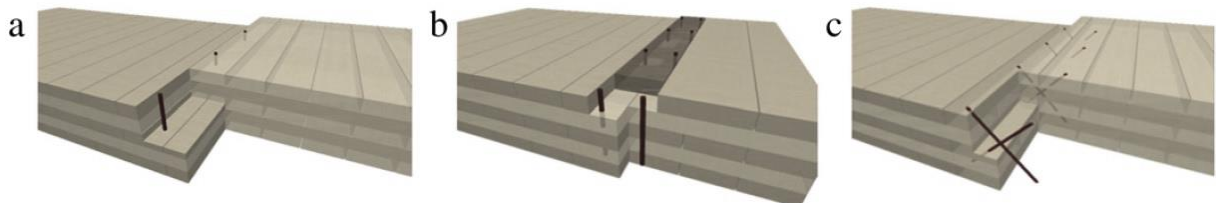
As paredes foram sujeitas a carga lateral monotônica e cíclica, usando um atuador hidráulico de 110KN. Para as paredes testadas com cargas monotônica as

taxas de deslocamento aplicadas foram entre 0,2mm/s e 0.4mm/s. Para os testes cíclicos foram utilizados os métodos: CUREE (Método C), especificados pela ASTM E 2126 (2009) (Método B) e taxa de deslocamento de 5mm/s.

Popovski, Schneider e Schweinsteiger (2010) concluíram que os conectores fixados com pregos e parafusos ao CLT e a fundação apresentaram desempenho adequado para áreas de abalos sísmicos. No caso do painel sobreposto, que formava dois pavimentos, os autores afirmaram que não devem ser utilizados parafusos longos em ângulo para conectar uma parede a outra em áreas com alta interferência sísmica, pois essa ligação tem menor comportamento dúctil.

Fragiacomo, Dujic e Sustersic (2011) avaliaram as ligações entre painéis de CLT para edifícios de vários andares sob ações sísmicas. Os autores compararam três possibilidades de ligações em CLT (figura 6) para conexão de piso-piso e concluíram que a mais indicada para áreas de abalos sísmicos é a do caso “c”.

Figura 6: Possibilidade de configurações de ligações entre painéis de CLT.



Fonte: Adaptado de FRAGIACOMO; DUJIC; SUSTERSIC, 2011.

Posteriormente, Fragiaco, Dujic e Sustersic (2011) apontam algumas críticas à respeito da falta de especificações no Eurocode 8 e Eurocode 5 para projetar estruturas de CLT em áreas sob ações sísmicas. No transcorrer da pesquisa, os autores apresentam informações para complementar ou embasar projetos de CLT para essas áreas, bem como, exemplificaram as condições com um estudo de caso.

Gravic, Fragiaco e Ceccotti (2012) apresentam alguns dos resultados do programa experimental realizado no instituto de pesquisa CNR-IVALSA, que tem por objetivo fornecer uma melhor compreensão do desempenho das conexões em edifícios de CLT sujeitos a ações sísmicas.

No programa, foram testadas 20 configurações, divididas em três estudos distintos. Nesse especificamente, foram explorados os testes de conexões entre painéis aparafusados que consistiu em 12 configurações, conforme tabela 1.

Tabela 1: 12 Configurações testadas no programa experimental de ligações de CLT.

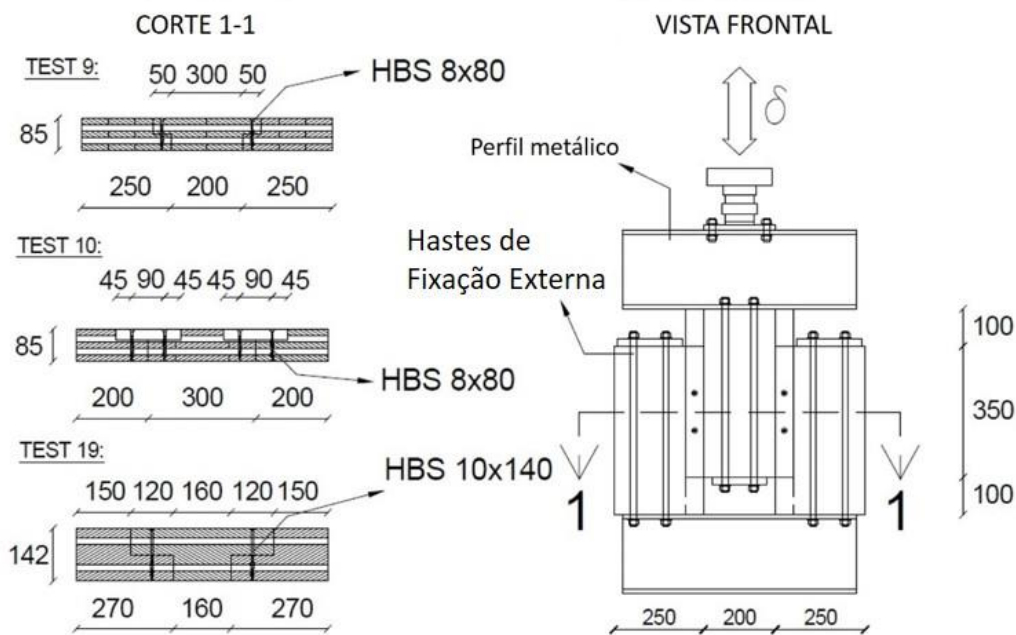
CONFIGURAÇÕES			
CONEXÕES PAINÉIS PAREDE - PAREDE (PAINÉIS PARALELOS)			
9	10	11	12
Direção Carregamento: Paralelo Lateral	Direção Carregamento: Paralelo Lateral	Direção Carregamento: Perpendicular Lateral	Direção Carregamento: Perpendicular Lateral
Encaixe: Lap Joint	Encaixe: Spline Joint	Encaixe: Lap Joint	Encaixe: Spline Joint
Ligações: HBS ϕ 8x80mm	Ligações: HBS ϕ 8x80mm	Ligações: HBS ϕ 8x80mm	Ligações: HBS ϕ 8x80mm
Quantidade: 2x2 parafusos	Quantidade: 2x4 parafusos	Quantidade: 2 parafusos	Quantidade: 2x2 parafusos
CONEXÕES PAINÉIS PAREDE - PAREDE (PAINÉIS ORTOGONAIS)			
13	14	15	
Direção Carregamento: Perpendicular Lateral	Direção Carregamento: Perpendicular Lateral	Direção Carregamento: Retirada	
Ligações: HBS ϕ 10x180mm	Ligações: HBS ϕ 10x180mm	Ligações: HBS ϕ 10x180mm	
Quantidade: 2x2 parafusos	Quantidade: 2x2 parafusos	Quantidade: 4 parafusos	
CONEXÕES PAINÉIS PAREDE - PISO			
16	17	18	
Direção Carregamento: Perpendicular Lateral	Direção Carregamento: Perpendicular Lateral	Direção Carregamento: Retirada	
Ligações: HBS ϕ 10x260mm	Ligações: HBS ϕ 10x260mm	Ligações: HBS ϕ 10x260mm	
Quantidade: 2x2 parafusos	Quantidade: 2x2 parafusos	Quantidade: 4 parafusos	
CONEXÕES PAINÉIS PISO - PISO			
19	20		
Direção Carregamento: Paralelo Lateral	Direção Carregamento: Perpendicular Lateral		
Encaixe: Lap Joint	Encaixe: Lap Joint		
Ligações: HBS ϕ 10x140mm	Ligações: HBS ϕ 10x140mm		
Quantidade: 2x2 parafusos	Quantidade: 2 parafusos		

Fonte: Adaptado de GRAVIC; FRAGIACOMO; CECCOTTI, 2012.

As conexões com parafusos foram avaliadas para painéis parede-parede ou paralelos, parede-parede perpendicular, parede-piso e piso-piso. O modelo de parafuso HSB foi utilizado em todos os casos, variando o diâmetro e comprimento.

Os encaixes das juntas diferiram entre *lap joint* e *spline joint*. Submeteram-se as paredes adjacentes a testes de cisalhamento no plano (figura 7), enquanto que as paredes ortogonais, ao cisalhamento em duas direções diferentes e a carga de retirada.

Figura 7: Configurações 9,10, 19, modelo de teste para paredes adjacentes, medidas em milímetros.



Fonte: Adaptado de GRAVIC; FRAGIACOMO; CECCOTTI, 2012.

Para todas as configurações realizaram-se testes monotônicos e cíclicos, uma e seis amostras de cada, respectivamente. As dimensões dos corpos de prova variaram em: 20 x 45; 25 x 45; 30 x 45; 35 x 45 e 40 x 45 (largura x altura em centímetros), de 3 a 5 camadas.

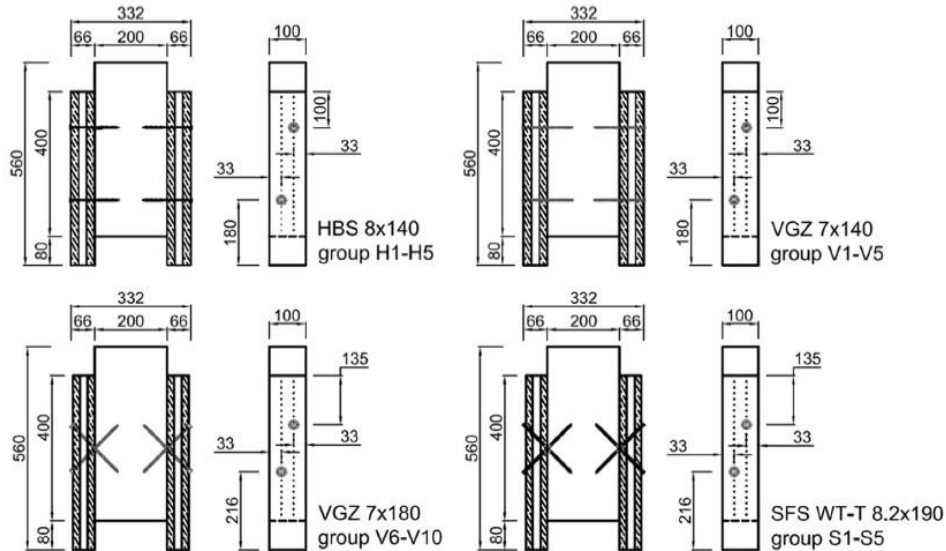
O protocolo de teste referenciou-se na EN 12512 (2001) e no Eurocode 8 (EN 1998-1), assim como a análise dos resultados, que foram avaliados em termos de força, rigidez, dissipação de energia, relação de amortecimento e ductilidade. As conexões com juntas *half-lap* apresentaram rigidez maior em comparação com as juntas *spline* (GRAVIC; FRAGIACOMO; CECCOTTI, 2012).

Branco, Kekeliak e Lourenço (2015) analisaram as ligações de CLT com uma placa de madeira maciça da classe C18, estipulada pela norma EN 338, conforme exibido na figura 8, na qual o elemento central é a placa e nas laterais os painéis de CLT. Foram avaliadas 20 conexões, por meio de testes *push-out* (EN 26891: 1991).

Os testes foram divididos em quatro grupos de cinco, de acordo com o tipo de parafuso, inclinação em relação à direção do corte e a medida do ângulo: HBS 8 x 140

(meio roscado) e VGZ 7 x 140 (totalmente roscado) colocado em ângulo de 90° em relação ao plano de cisalhamento; SFS WT-T-8.2 x 190 (meio roscado) e VGZ 7 x 180 (totalmente roscado) colocado inclinado a 45° em relação ao plano de cisalhamento (BRANCO; KEKELIAK; LOURENÇO, 2015).

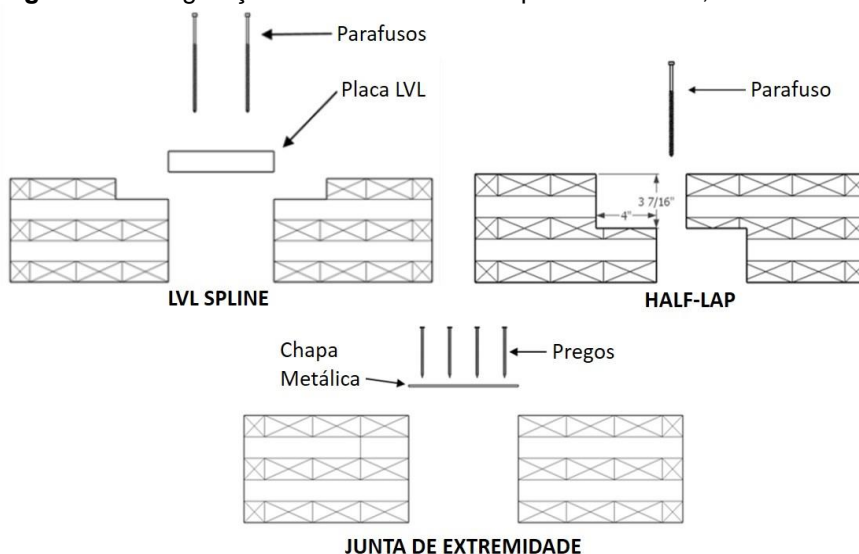
Figura 8: Configuração dos corpos de provas (dimensões em milímetros).



Fonte: BRANCO; KEKELIAK; LOURENÇO, 2015.

Os resultados encontrados, por Branco, Kekeliak e Lourenço (2015), foram de que o valor médio da capacidade de carga da conexão, com parafusos inclinados a 45° é cerca de uma vez e meia maior do que os colocados a 90°, enquanto que nos testes de deslocamento, a rigidez em 45° foi seis vezes e meia mais alta do que a 90°.

Figura 9: Configurações de teste avaliadas por Richardson, 2015.



Fonte: Adaptado de RICHARDSON, 2015.

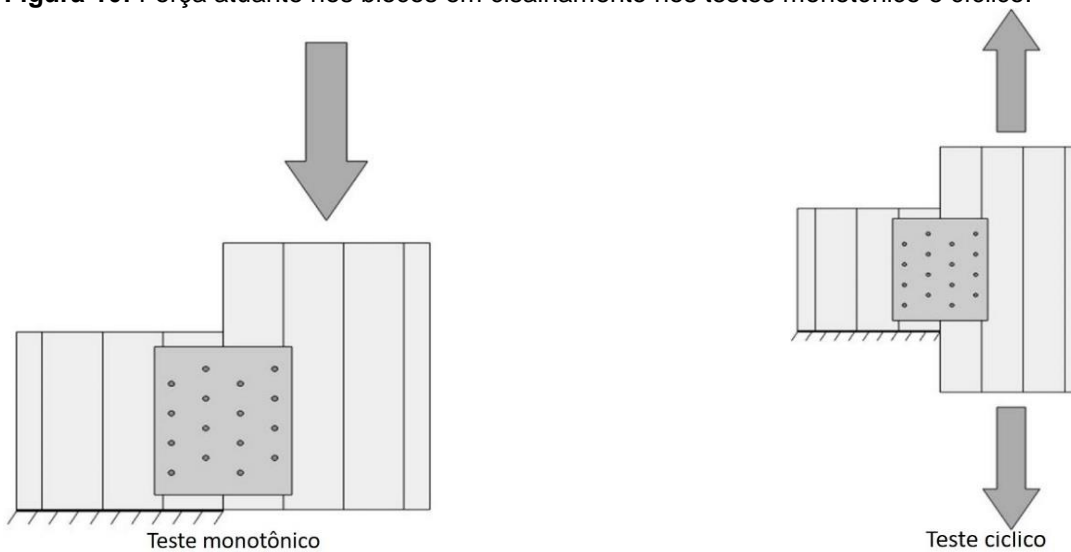
Richardson (2015) avaliou o comportamento de ligações entre painéis adjacentes (parede-parede), por meio de corpos de prova em pequena escala, com três configurações: encaixe LVL *spline* conectado com parafusos, encaixe *half-lap* com parafusos e junta de extremidade com placa de aço e pregos (figura 9). Todas as configurações foram submetidas a testes monotônicos e cíclicos.

Para cada configuração, foi elaborada 5 amostras, no total de 30 divididas em:

- 15 para testes monotônicos – corpo de prova de 12” x 12” x 6 7/8” (30,48 x 30,48 x 17,47cm) conectado ao bloco de CLT 12” x 18” x 6 7/8” (30,48 x 45,72 x 17,47cm).
- 15 para cíclicos – corpo de prova de 12” x 12” x 6 7/8” (30,48 x 30,48 x 17,47cm) conectado ao bloco de CLT 12” x 24” x 6 7/8” (30,48 x 60,96 x 17,47cm).

As cargas aplicadas nos dois tipos de testes induziram o cisalhamento entre os blocos. Na figura 10, encontra-se a indicação das forças atuantes com as flechas, assim como o bloco apoiado, possibilitando o deslizamento do outro.

Figura 10: Força atuante nos blocos em cisalhamento nos testes monotônico e cíclico.

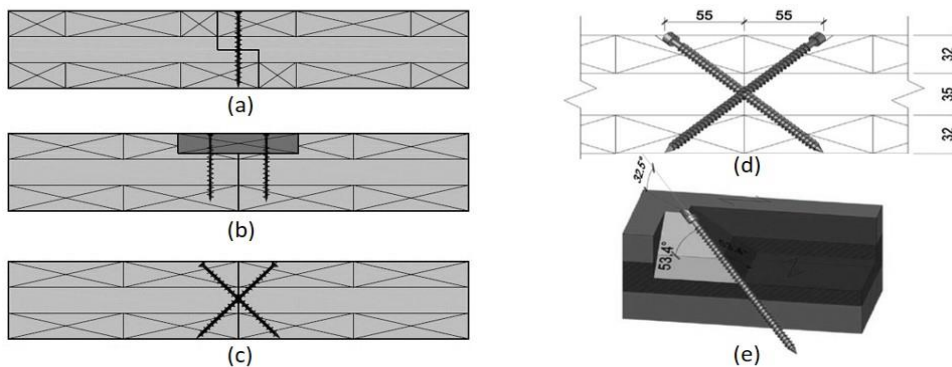


Fonte: Adaptado de RICHARDSON, 2015.

Os testes os cíclicos seguiram o padrão estabelecido pela ASTM E2126-11 (2013) [CUREE (*Method C*)]. Analisou-se o desempenho de cada conexão, a rigidez e ductilidade. Entre os resultados, a junta de extremidade com chapa de aço obteve a maior média de rigidez ao cisalhamento (75%), enquanto a *spline* o valor médio mais baixo e a *half-lap* média de 28,7%.

Na pesquisa de Hossain, Danzing e Tannert (2016), o objetivo foi analisar a conexão de painéis paredes com junta simples (c) e parafusos locados em ângulo, conforme esboçado na figura 11, que normalmente são executadas como em (a) *half-lap* e (b) *spline*. De acordo com os autores, a junta simples não requer usinagem adicional do painel, diminuindo o custo e um processo durante a industrialização.

Figura 11: Conexões comumente utilizadas em CLT (a) e (b) e conexão testada (c) e locação dos parafusos (d) e (e).



Fonte: Adaptado de HOSSAIN; DANZING; TANNERT, 2016.

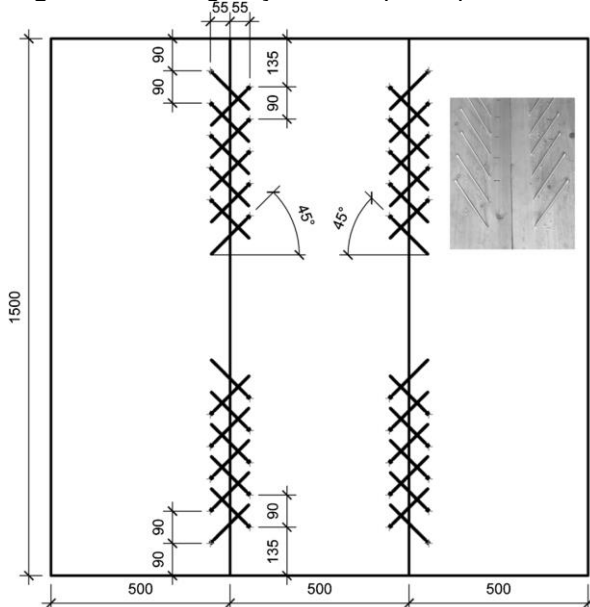
Os corpos de prova consistiram em 3 painéis de CLT com 3 camadas, 99mm de espessura, 500mm de largura e 1500mm de comprimento, com dois planos de cisalhamento. Os parafusos STS utilizados foram de 8mm de diâmetro e 180mm de comprimento, empregados como no esboço da figura 11 (d), no qual os espaçamentos entre os parafusos são determinados pela ETA-11/0190 (ETA 2013).

Os parafusos STS foram instalados em um ângulo de 45° em relação a linha da junta, entre os painéis CLT e um ângulo de $32,5^\circ$ em relação a face dos painéis (Figura 11- e). Essa instalação de parafuso com dupla inclinação resultou em um ângulo composto α entre a direção da fibra da madeira e o eixo da conexão de $53,4^\circ$, com os parafusos sendo carregados em arrancamento. Como a direção da fibra das camadas exteriores era paralela à direção da carga de cisalhamento, o ângulo entre a carga e o eixo do parafuso (subsequentemente rotulado β) também era $53,4^\circ$ (HOSSAIN; DANZING; TANNERT, 2016).

A configuração final dos painéis com as ligações de parafusos é apresentada na figura 12. O espaçamento entre os dois grupos de parafusos foi de 600mm. O programa experimental consistiu em sete ensaios estáticos e quatro ensaios cíclicos, com força aplicada por um atuador hidráulico. Os métodos para embasamento dos

testes estáticos e cíclicos foram os estipulados pela EN-26891 (1991) e a ASTM E2126-11 (2013) [CUREE (*Method C*)], respectivamente.

Figura 12: Configuração do corpo de prova com ligações de parafusos STS.



Fonte: HOSSAIN; DANZING; TANNERT, 2016.

Os resultados obtidos para os testes estáticos demonstraram que as ligações apresentaram proporção média de ductilidade de 7,7mm, sendo classificada como altamente dúctil e rigidez de 14,5mm, enquanto que para os testes cíclicos, a média foi de 4,1mm ou ductilidade moderada e rigidez de 7,5mm (HOSSAIN; DANZING; TANNERT, 2016).

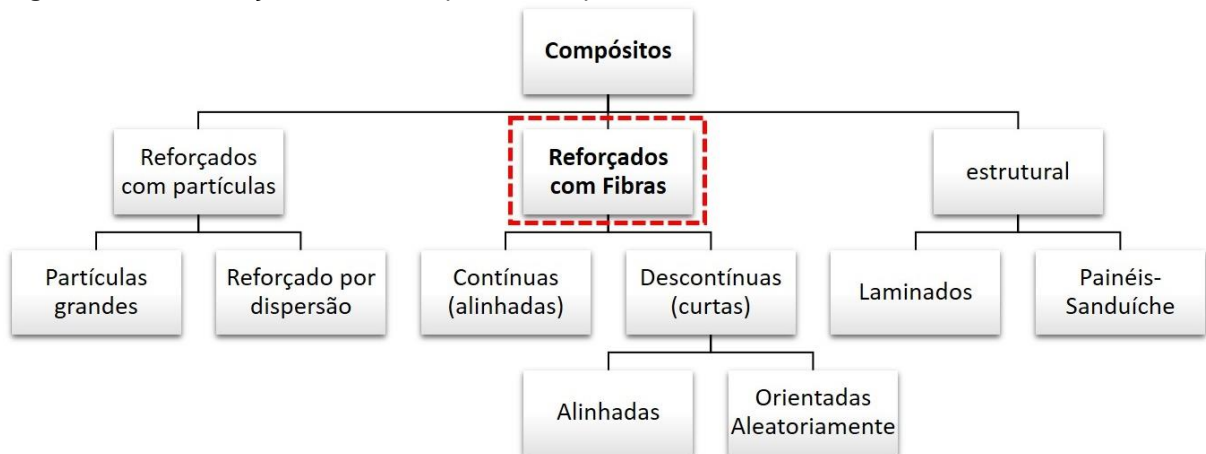
Segundo Hossain, Danzing e Tannert (2016), os resultados do estudo provam ser viável a ligação entre painéis de CLT com parafusos em ângulo e resistência a cargas laterais. Além disso, a ligação é vantajosa, no que diz respeito a junta simples, visto que evita usinagem dispendiosa do painel CLT.

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos, normalmente, são constituídos por duas fases: a matriz – que pode ser feita por metais, polímeros ou cerâmicas e a fase dispersa – partículas que são envolvidas pela matriz (CALLISTER JR, 2002).

Os compósitos são classificados em: reforçados com partículas, reforçados com fibras e estruturais (Figura 13). Desses destacam-se os reforçados com fibras que, tecnologicamente, são os mais importantes, quando o objetivo é resistência e/ou rigidez alta em relação ao peso do material (CALLISTER JR, 2002).

Figura 13: Classificação dos vários tipos de compósitos.



Fonte: Adaptado de CALLISTER JR, 2002.

Os reforçados com fibras, como apresentado na figura 13, são categorizados conforme o comprimento das fibras: a) contínuas (alinhadas) e b) descontínuas (curtas), que por sua vez podem ser dispostas alinhadas ou orientadas aleatoriamente.

2.2.1 Fase Matriz: Polímeros

A fase matriz, de modo geral, é feita por metais ou polímeros, quando é desejável ductilidade, enquanto as cerâmicas são para melhorar a tenacidade à fratura (CALLISTER JR, 2002). Nessa pesquisa, mediante ao objetivo, utiliza-se como foco de estudo a matriz polimérica.

Os polímeros, segundo Callister Jr. (2002), são mais empregados como matriz de compósitos, devido as suas propriedades à temperatura ambiente, a facilidade de fabricação e ao custo desses materiais e são classificados em termoplásticos e termofixos:

Os termoplásticos amolecem quando são aquecidos (e por fim se liquefazem) e endurecem quando são resfriados, processos que são totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. [...] os polímeros termofixos se tornam

permanentemente duros quando submetidos a aplicação de calor e não amolecem com aquecimento subsequente (CALLISTER JR, 2002, p. 336).

As resinas poliméricas mais aplicadas, de acordo com Callister Jr. (2002), são: os poliésteres, os vinis ésteres – menor custo – e os epóxis, maior custo, entretanto com melhores propriedades mecânicas e resistência à umidade, do que os primeiros.

2.2.1.1 Resinas epóxis

As resinas epóxi são polímeros termofixos, oferecem excelentes propriedades mecânicas, alta resistência, ótima aderência a diversos substratos, resistência química e são intensamente aplicadas em diversos campos (BOYLE et al., 2001) e (JIN; LI; PARK, 2015).

Segundo Boyle et al. (2001), a formulação das resinas epóxi são definidas por três elementos:

- A resina base – subdividida em três classes principais: éteres glicidílicos fenólicos, glicidilaminas aromáticas e cicloalifáticos;
- O agente de cura – os mais comuns são aminas, derivados de amina e anidridos;
- Os modificadores - incluem borrachas, termoplásticos, diluentes, retardadores de chama, enchimentos e pigmentos e corantes;

Cada elemento, supracitado, é escolhido de acordo com as propriedades físicas e mecânicas desejadas para o produto final. A primeira resina epóxi da classe de éteres glicidílicos fenólicos, na escala comercial e também mais comum, é o éter diglicidílico de bisfenol-A (DGEBA) (BOYLE et al., 2001) e (JIN; LI; PARK, 2015).

Na escala de produção, as resinas epóxi são fabricadas com dois componentes: a resina e o endurecedor, em que as proporções de cada componente são determinadas de acordo com a relação solicitada, devendo seguir exatamente essa orientação para que a cura ocorra, desse modo, são chamados de sistemas (resina mais endurecedor) (ORTENZI JUNIOR, 2007).

2. 2.1.2 O processo de cura dos polímeros

De acordo com Ortenzi Junior (2007), só é possível a utilização de polímeros, se esses, estiverem solubilizados. Para tal, o principal solvente é o monômero de estireno, com duas finalidades: solubilizar o plástico e entrelaçar as ligações químicas no processo de cura; quando solubilizados, os polímeros passam a ser nomeados resinas.

Os agentes de cura são denominados catalisadores, destacando para essa função o Peróxido de Metil Etil Cetona - MEKP, outros menos comuns são: o Peróxido de Benzoíla – BPO – eficiente, entretanto muito sólido, dificultando a mistura – e o Peróxido e Acetil Acetona – AAP. Além disso, a cura da resina está condicionada a temperatura, no caso do MEKP, o processo acontece em temperatura ambiente (ORTENZI JUNIOR, 2007).

O processo de cura do bisfenol-A, pode ocorrer em temperatura ambiente após a adição de trietileno tetramina, sem a necessidade de submissão a altas temperaturas, como no caso de outras resinas bases (BOYLE et al., 2001) e (JIN; LI; PARK, 2015).

2.2.2 Fase Dispersa: A fibra de vidro

A fibra de vidro é derivada de alguns compostos químicos, com base principal de areia, calcário, óxido de alumínio e óxido de magnésio, que por meio de uma mistura proporcional e fusão desses minerais, obtêm-se os diversos tipos de fibras de vidro (ORTENZI JUNIOR, 2007).

Há diversas finalidades para a fabricação desse material e de acordo com o processo de filamentação resulta-se vários produtos, entre eles: feltros para isolamento termoacústico; fios para tecelagem de tecidos especiais variados; fios para fabricação de mantas e tecidos com objetivos estruturais (ORTENZI JUNIOR, 2007).

Segundo Fiorelli (2002), as fibras de vidro são categorizadas em: tipo “E” (*electrical*), tipo “C” (*chemical*) e tipo “S” (*high tensile strength*). Ortenzi Junior (2007) aponta a existência de um quarto tipo, “AR” (*alkali-resistant*). O autor, ainda, afirma que as classificações são consideradas conforme a composição química de cada fibra.

As fibras de vidro tipos “E” e “AR” são produzidas em escala industrial, enquanto a tipo “S” está restrita a produção para a indústria aeroespacial e a tipo “C”

tem sido substituída por outras fibras, com custo mais competitivo, para utilização em ambientes de alta exposição química (ORTENZI JUNIOR, 2007). Na tabela 2, são destacadas as principais características de cada tipo de fibra, assim como a qualidade das resistências mecânica e química.

Tabela 2: Classificação das fibras de vidro, principais características e resistências mecânica e química.

Tipo de Vidro	Principais características	Resistência Mecânica	Resistência Química
E	Isolamento eletro-magnético	Muito boa	Boa
AR	Álcali-resistente	Boa	Ótima
S	Alta resistência mecânica/térmica	Ótima	Muito boa
C	Alta resistência química	Boa	Ótima

Fonte: ORTENZI JUNIOR, 2007 apud OWENS CORNING, 1993; SAINT-GOBAIN, 2002.

Na produção da fibra de vidro, os filamentos são unificados por silano, com fios não torcidos em uma bobina, nomeada *roving*. O silano é um composto que recobre os fios e os torna compatíveis com os polímeros. A quantidade de filamentos por feixe em um *roving* é de 4 a 4000 TEX – unidade de medida equivalente a g/km (ORTENZI JUNIOR, 2007).

Além disso, ainda no processo de produção, os tecidos de fibra de vidro são classificados em: unidirecionais; bidirecionais; *rovings* não entrelaçados e tecidos finos, conforme Ortenzi Junior (2007).

Nessa pesquisa, o tipo a ser empregado são os tecidos unidirecionais. Neles as resistências em cada sentido ortogonal são divergentes, chegando atingir uma relação de 1:8, entre o sentido transversal e longitudinal (ORTENZI JUNIOR, 2007).

2.2.3 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras

Os compósitos de matriz poliméricas são amplamente empregados no setor industrial, com aumento de uso de 5% ao ano, sendo que combinados com reforço de fibras, 40% das matrizes tem o tipo epóxi. Esses materiais são utilizados na indústria aeroespacial, automobilística e na construção civil - como reparo e adequação de pontes (REZENDE; BOTELHO, 2000).

A matriz polimérica, combinada ao reforço de fibras, irá gerar uma nova nomenclatura, que dependerá do tipo de fibra utilizada, por exemplo: compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (*Glass Fiber-Reinforced Polymer – GFRP*)

e os compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono (*Carbon Fiber-Reinforced Polymer – CFRP*).

Os compósitos GFRP consiste em fibras de vidro, contínuas ou descontínuas, envoltas pela matriz polimérica e possui resistência específica muito alta, entretanto, não têm características muito rígidas para certos tipos de aplicações que exigem essa propriedade. Eles são encontrados em: carcaças de meios de transportes automotivos e marítimos, recipientes para armazenamento e pisos industriais (CALLISTER JR, 2002).

Já os compósitos CFRP, conforme pontuado por Callister Jr. (2002), são materiais com fibras de carbono de alto desempenho e possuem as maiores resistências específicas entre todos os materiais fibrosos de reforço, têm múltiplas características físicas e mecânicas, porém oxidam submetidos a temperaturas elevadas.

Na tabela 3, está apresentada as propriedades mecânicas dos GFRP e CFRP, para uma situação em que as fibras são contínuas e orientadas alinhadamente, nas direções longitudinais e transversais:

Tabela 3: Propriedades mecânicas dos Compósitos Poliméricos Reforçados com fibras de Vidro e Carbono

<i>Propriedade</i>	<i>Compósitos Poliméricos Reforçados com fibras de Vidro (GFRP)</i>	<i>Compósitos Poliméricos Reforçados com fibras de Carbono (CFRP)</i>
<i>Densidade relativa</i>	2,1	1,6
<i>Módulo de tração:</i>		
Longitudinal [GPa (10^6 psi)]	45 (6,5)	145 (21)
Transversal [GPa (10^6 psi)]	12 (1,8)	10 (1,5)
<i>Limite de resistência à tração</i>		
Longitudinal [Mpa (ksi)]	1020 (150)	12402 (180)
Transversal [Mpa (ksi)]	40 (5,8)	41 (6)
<i>Deformação no limite de resistência à tração</i>		
Longitudinal	2,3	0,9
Transversal	0,4	0,4

Fonte: Adaptado de CALLISTER JR, 2002.

Comparando as propriedades e características, dos GFRP e CFRP (Tabela 3), nota-se que existem diferenças mecânicas entre os materiais, nas quais os CFRP são superiores aos GFRP. Entretanto, devido as questões de custo elevado da fibra de carbono e a disponibilidade das fibras de vidro, essa pesquisa irá optar pelo GFRP.

Antes do processo de produção do GFRP, é necessário a definição de alguns requisitos: a orientação de aplicação das fibras, o polímero utilizado na matriz, o teor de fibras em relação ao peso total e o sistema de cura do compósito (ORTENZI JUNIOR, 2007).

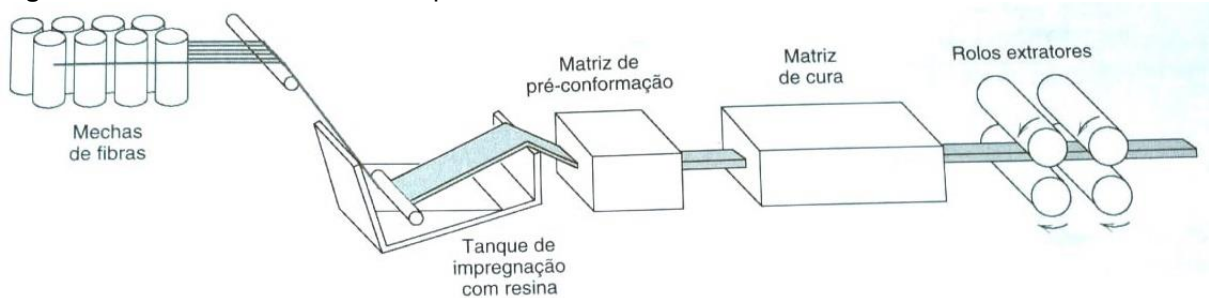
A orientação das fibras foi abordada no subcapítulo 2.2.2, assim como o tipo de polímero constituinte da matriz no subcapítulo 2.2.1. O teor de fibras é determinado segundo o processo de produção do compósito e o sistema de cura será apresentado na seção subsequente.

2. 2. 3.1 Processo de produção dos polímeros reforçados com fibras

A produção de compósitos reforçados com fibras pode ser feita por diversas técnicas. Entre elas têm-se o processo de pultrusão, um procedimento totalmente mecanizado, para escalas de produção de grandes volumes.

Segundo Callister Jr. (2002, p.376), “a pultrusão é usada para fabricação de componentes que possuem comprimentos contínuos e que têm um formato de seção reta constante (isto é, barras, tubos, vigas, etc.)”.

Figura 14: Processos da técnica de pultrusão.



Fonte: CALLISTER JR, 2002.

A técnica está ilustrada na figura 14, os filamentos saem dos *rovings* e passam pela impregnação de uma resina termofixa, depois são estirados, através de um molde de aço que pré-conforma a peça da forma desejada e estabelece a razão/teor da matriz e fibra (CALLISTER JR, 2002).

Em seguida, o material passa por um molde de cura, usinado com precisão, para conferir ao produto sua forma final. Esse molde é aquecido, com a finalidade de dar início ao processo de cura da resina (matriz). Um dispositivo de puxar estira o

material através dos moldes, além disso determina a velocidade de produção (CALLISTER JR, 2002).

De acordo com Callister Jr. (2002), os principais reforços utilizados nesse processo são as fibras de vidro, carbono e aramidas. As resinas usuais para as matrizes incluem as poliésteres, as ésteres vinílicas e as epóxi. O teor de fibra é determinado conforme o processo de produção do compósito. Para a pultrusão, a concentração de fibra é entre 40% e 70%.

Posteriormente à etapa de produção dos compósitos, conforme a orientação da fibra em relação ao plano, o material pode ser classificado em (ORTENZI JUNIOR, 2007):

- Anisotrópico: as fibras são dispostas de forma multidirecional, resultando em propriedades mecânicas diferentes em cada direção.
- Isotrópico: fibras posicionadas de forma multidirecional, apresentando propriedades mecânicas similares em todas as direções.
- Ortotrópico: as fibras são locadas de maneira bidirecional ortogonal, originando propriedade mecânicas em duas direções ortogonais paralelas às fibras.

É de suma importância ressaltar que os compósitos - diferentemente de outras estruturas - sejam projetados para apresentar o desempenho mecânico desejado, por meio dos cálculos que serão abordados na seção 2.4.3.

2.2.4 Estruturas de madeira reforçadas com compósitos

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro e com fibras de carbono, têm sido aplicados na construção civil, como: reforços, reparos e adequações de estruturas de madeira. Nos estudos de Gentile et al. (2002), Fiorelli e Dias (2003) e Amy e Svecova (2004), os compósitos foram aplicados para reforçar vigas de madeira.

Gentile et al. (2002) testou o reforço de vigas de madeira, introduzindo barras de GFRP, em cortes longitudinais na lateral das vigas. Os corpos de prova foram submetidos a testes de resistência a flexão, resultando em vigas com aumento de 64% de ductilidade e de 5% a 7% da rigidez, comparados às vigas não reforçadas.

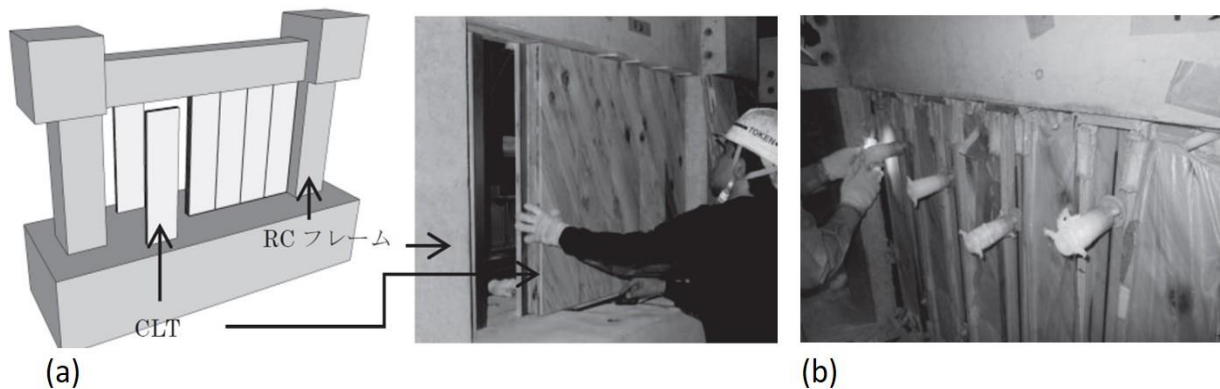
No estudo desenvolvido por Fiorelli e Dias (2003), no ensaio as vigas também foram submetidas à flexão, entretanto o reforço com FRP foi colado com resina epóxi AR-300 na parte interna da viga, sendo o volume de: 1,0% fibra de vidro ou 0,4% fibra de carbono, proporcional ao volume da madeira. Os resultados obtidos foram de vigas com aumento de rigidez – variação de 15% a 30% a mais que as vigas não reforçadas.

Amy e Svecova (2004) fizeram sua investigação em vigas de madeira utilizadas em pontes no Canadá. O reforço com placas de GFRP foi locado na face interna das vigas e também com barras de GFRP inseridas no interior das vigas. No ensaio, as vigas foram sujeitas à flexão. Nesse caso, a rigidez permaneceu igual a não reforçada, já a ductilidade teve aumento de 56% com o reforço.

A experiência mais próxima do objetivo dessa pesquisa, foi realizada por Haba et al. (2016), a finalidade do estudo foi encontrar soluções para restaurar estruturas de concreto armado após ações sísmicas.

No ensaio, os painéis de CLT foram locados no quadro de concreto armado (figura 15) e posteriormente um painel foi colado ao outro por injeção de adesivo epóxi, bem como os painéis contíguos ao quadro.

Figura 15: Configuração do quadro de concreto com reforço de painéis de CLT (a). Injeção de adesivo epóxi entre painéis de CLT.



Fonte: Adaptado de HABA et al., 2016.

Previamente, os pesquisadores analisaram o desempenho do CLT colado com o adesivo epóxi, por meio de teste de cisalhamento entre painéis. Segundo os resultados de Haba et al. (2016), a ruptura nas amostras aconteceu próxima a interface do painel e não na interface de adesão, por isso afirmaram que a resistência de cisalhamento do plano de colagem é maior que a resistência de cisalhamento do CLT.

2.3 METODOLOGIAS DE ENSAIO ENCONTRADOS NA LITERATURA

A metodologia dessa pesquisa foi dividida em duas partes: a modelagem paramétrica computacional e os ensaios físicos experimentais realizados em laboratório. Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica desses dois métodos.

2.3.1 Método de Modelagem Paramétrica Computacional

A modelagem paramétrica é realizada em um sistema conhecido como *Computer Aided Engineering* (CAE), e segundo Reng (1994, apud BALASTRERO JUNIOR, 2010), ela é uma ferramenta de trabalho computacional que auxilia no desenvolvimento de projetos, por meio de análises pré-definidas, como: análises estáticas, dinâmicas, térmicas, magnéticas de fluidos, acústicas, de impacto e simulações de funcionamento. Balastrero Junior (2010) afirma que os principais sistemas CAE comerciais têm por base o método de elementos finitos.

O método de elementos finitos (MEF), de acordo com Lotti et al. (2006, p. 1), “é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original”.

Na área de engenharia, segundo Soriano (2003, p. 3 e 4), o MEF “é o que se aplica de forma mais ampla, simples e eficiente em análise estrutural” e que nos últimos anos não foi possível projetar estruturas contínuas inovadoras sem esse método.

De acordo com Lotti et al. (2006), para a análise estrutural com o MEF, é importante definir o objeto de pesquisa, posteriormente determina-se a geometria da estrutura e deve-se desenhar graficamente em *softwares* específicos, por exemplo: o *SolidWorks®* (*Dassault Systèmes SolidWorks Corporation*, 1993).

A estrutura será particionada em pequenos elementos (MEF), que representam coordenadas no espaço e assumem diversos formatos, ou seja, quanto maior for o número de elementos, mais preciso será o modelo (LOTTI et al., 2006).

Outro *software* com base em elementos finitos é o ANSYS® (*Analysis Systems Incorporated*), no qual é possível executar sete tipos de análises estruturais: estática, modal, harmônica, espectral e análise dinâmica explícita (MARINHO, 2002).

Na presente pesquisa, a análise a ser aplicada é a estática. Essa classificação é utilizada para se determinar deslocamentos, tensões, entre outros, sob condição de carga estática. Pode-se dividir em dois tipos: análise estática linear ou não linear (inclui plasticidade, tensão, rigidez, grandes deformações, hiperelasticidade) (MARINHO, 2002).

As análises não lineares também são consideradas de acordo com o tipo de material, como no caso daqueles que apresentam comportamento elástico não ideais, a exemplo de polímeros termoplásticos (GUTH, 2015).

De acordo com Marinho (2002), o processo de realização de uma análise estática é constituído por três etapas principais:

1ª – Construção do modelo – define-se o elemento, a geometria do modelo, as constantes reais, as propriedades dos materiais (módulo de elasticidade, densidade, coeficiente de *Poisson*, entre outros) e as coordenadas nodais dos elementos estruturais. Nessa etapa, podem ser feitas as condições de contorno – restrições de deslocamentos.

2ª – Aplicação da carga e obtenção de solução – define-se a força (pressão, forças de inércia etc.) e o carregamento é atribuído de duas formas: a um modelo sólido – *keypoints*, *lines*, *areas* – ou no modelo de elemento finito – nós e elementos. Se não estabelecidas as condições de contorno na etapa anterior, fazem-se nesta.

3ª – Análise dos resultados – após a resolução do modelo, deve-se proceder na análise e apresentação dos resultados, selecionando o foco de interesse entre os diversos parâmetros de resposta.

Ademais, o software ANSYS tem uma ferramenta intitulada *Probabilistic Design System* – PDS que tem por finalidade trabalhar com as incertezas das variáveis de entrada ou dados inseridos no momento de solucionar a simulação (SILVA, 2017).

Reng (1994, apud BALASTRERO JUNIOR, 2010) afirma que a vantagem em simular sistemas previamente a realização dos ensaios, com as mesmas finalidades, é o custo. Além disso, o desenvolvimento dos cálculos complexos por meio do emprego de ferramentas computacionais CAE, aumentam a produtividade global, com considerável diminuição do tempo de ciclo dessa fase.

Nota-se que o método de modelagem paramétrica computacional tem potencial significativo para pesquisas experimentais. Os softwares operados pelo sistema CAE,

com base em elementos finitos, como referenciados - *SolidWorks* e *ANSYS* – são ferramentas importantes para o processo metodológico dessa pesquisa.

2.3.2 Método Experimental – Ensaaios

Os ensaios experimentais devem seguir metodologias determinadas por normas. Previamente a exibição dos parâmetros de testes, faz-se necessária a especificação dos tipos de carregamentos, posto que esses foram citados nos estudos entre ligações de CLT.

2.3.2.1 Tipos de Carregamentos

Considerar como os carregamentos atuam sobre as estruturas é fundamental, visto que esses se manifestam de diversas maneiras e podem originar falhas catastróficas (AZEVEDO, 2016). Para tal, é de suma importância compreender os tipos de carregamentos atuantes:

- Estático: “entende-se como carregamento estático todo carregamento em que a carga é aplicada gradativamente e permanece sem variações de intensidade ao longo do tempo” (AZEVEDO, 2016, p.5).
- Quase estático: “entende-se como carregamento quase estático todo carregamento em que a carga é aplicada subitamente e depois permanece sem variações de intensidade ao longo do tempo” (AZEVEDO, 2016, p. 5).
- Dinâmico: “todo carregamento em que o tempo é uma das variáveis na aplicação da carga, podendo ser constante ou apresentar variações de intensidade ao longo do tempo” (AZEVEDO, 2016, p. 5).

Além disso, há os ensaios monotônico, nos quais, de acordo com Donato (2003, p. 30), “a aplicação da carga nos materiais se dá de forma uniaxial, contínua e crescente até a ruptura”, com a finalidade de averiguar as propriedades mecânicas dos materiais.

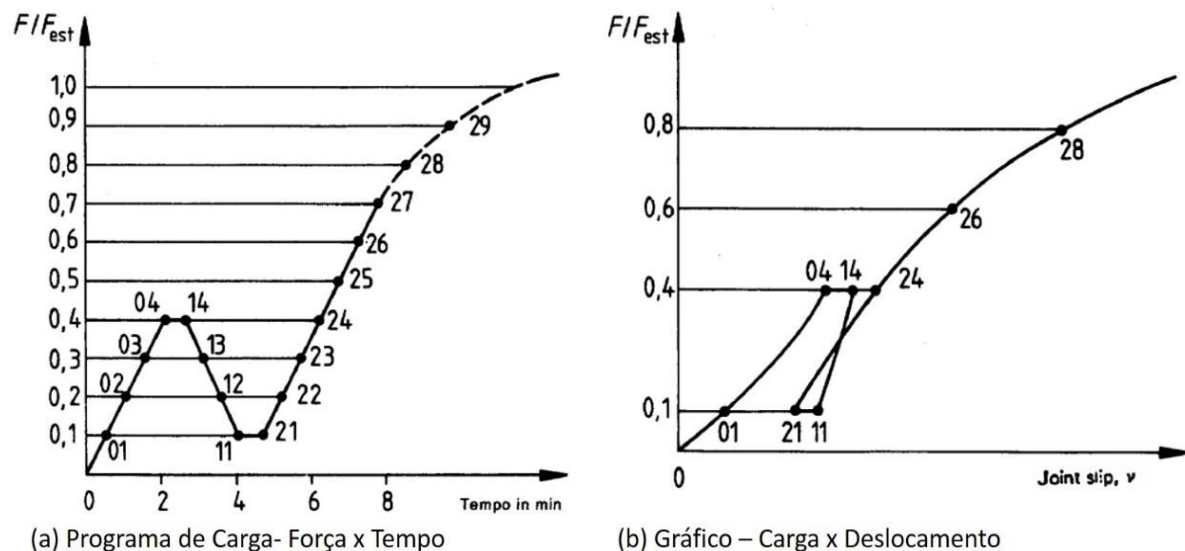
A determinação do tipo de carregamento pode ser feita de acordo com a normativa de embasamento do teste ou, segundo Azevedo (2016), no processo de dimensionamento, decorrente das restrições que sofrerá o material ou peça durante

sua vida útil. A presente pesquisa irá se limitar aos tipos de carregamentos estáticos e ensaios monotônicos.

2.3.2.2 Ensaio – Norma Europeia x Norma Brasileira

A Norma Europeia EN 26891 (1991) é um regulamento internacional, utilizado para testes de conexões mecânicas em estruturas de madeira com carregamento estático, definido por meio de um programa de carga, que consiste em uma força aplicada em função de tempo (figura 16 - a), resultando possivelmente em um gráfico parecido com o da figura 16 - b, de carga x deslocamento.

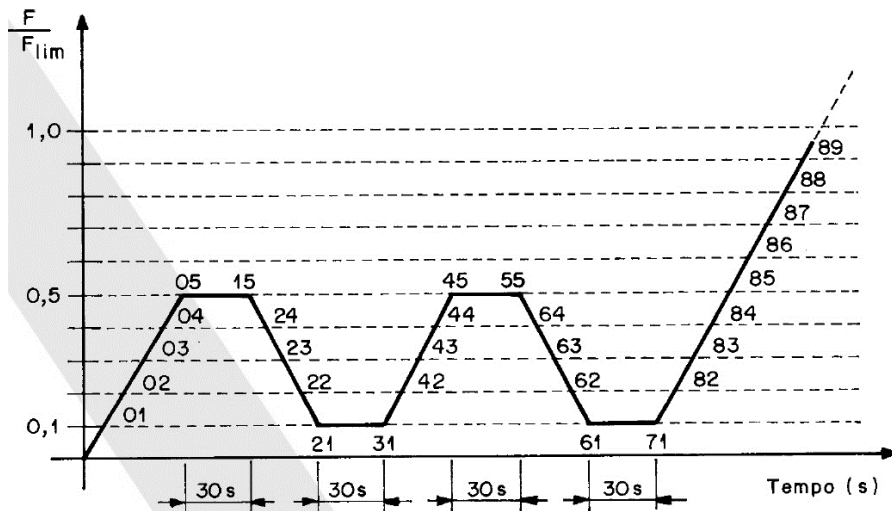
Figura 16: Gráficos da EN 26891: (a) programa de carga e (b) gráfico resultante.



Fonte: Adaptado de EN 26891, 1991.

A Norma Brasileira apresenta uma seção para ensaios de caracterização da resistência das ligações. Os procedimentos da NBR 7190 (1997) têm semelhança com os especificados na EN 26891 (1991). O ensaio consiste na aplicação de uma força em função de tempo, conforme diagrama da figura 17.

Tanto a NBR 7190, quanto EN 26891 solicitam um ajuste ou acomodação. A Norma Europeia propõe dois ciclos, enquanto a Norma Brasileira indica três ciclos para o ajuste (figura 17). Em alguns casos, a EN 26891 apresenta maior precisão, por exemplo: na determinação da carga limite - estipulada por um diagrama de carregamentos e descarregamentos sucessivos, resultando na carga máxima.

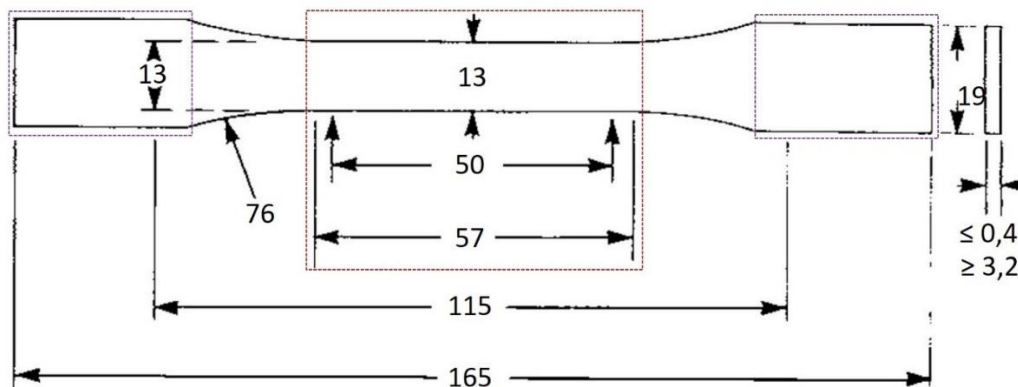
Figura 17: Diagrama de Carregamento determinado pela NBR 7190.

Fonte: NBR 7190, 1997.

A Norma Europeia é o parâmetro de teste comumente aplicado - de acordo com as revisões bibliográficas - para avaliar o desempenho das ligações entre painéis de CLT. Quando comparada a Norma Brasileira, nota-se que há similaridades nos procedimentos de ensaios.

2.3.2.3 Ensaio – ASTM D 638

A normativa ASTM D 638 (2008) “*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*” é designada para testes de materiais compósitos, especificamente para polímeros reforçados ou não. O corpo de prova é submetido a tração e por meio do *strain gage* mede-se a deformação na seção transversal e axial.

Figura 18: Modelo para confecção da amostra de compósitos poliméricos reforçados (medidas em mm).

Fonte: Adaptado de ASTM D 638, 2008.

As amostras podem ser confeccionadas segundo a figura 18, ou de acordo com o formato desejado, desde que seja possível a fixação das extremidades para o teste. O retângulo marrom representa a área a ser considerada nos resultados, enquanto os roxos são as partes, nas quais os corpos de prova serão fixados no equipamento para o teste. Todas as superfícies da amostra devem estar isentas de falhas, arranhões ou imperfeições (ASTM D 638, 2008).

Cada extremidade da amostra deve ser fixada por duas garras: uma fixa e outra móvel, possibilitando a aplicação da carga em uma velocidade de 5mm/min. A norma orienta a fixação adequada da amostra no equipamento, antes de efetuar o ensaio, evitando assim o escape.

A ruptura dos corpos de prova ocorre entre trinta segundos a cinco minutos de teste. O número de corpos de prova a serem ensaiados é dez: cinco para análise na seção transversal e mais cinco para avaliação axial.

2.4 CONFIGURAÇÕES DOS PAINÉIS CLT, CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

A confecção dos painéis de CLT segue diretrizes da norma ANSI/APA PRG 320 (2012) e esta pesquisa seguiu tal normativa. As dimensões dos painéis de CLT para testes de ligações, segundo Branco (2017), não são estipuladas por normativas, portanto são determinadas de acordo com as encontradas na literatura e/ou o tipo de teste a ser realizado.

2.4.1 Dimensões do corpo de prova e Configurações – Painéis de CLT

A norma ANSI/APA PRG 320 (2012), na seção 8.5 (*Mechanical Properties Qualification*) subseção 8.5.5 (*Shear test methods*), especifica que para testes de painéis em cisalhamento, a largura da amostra não pode ser inferior a 305mm. Entretanto, essa caracterização não é direcionada para testes de ligações. Sendo assim, com base na revisão de literatura, verifica-se as dimensões nos estudos investigados exibidas na tabela 4.

Tabela 4: Configurações e dimensões dos corpos de prova encontrados na literatura.

REFERÊNCIA	CONFIGURAÇÕES		DIMENSÃO (cm)
	PAREDE-PAREDE ADJACENTES		LAR. x ALT. x ESP.
REFERENCIADO ¹	Joyce; Ballerini; Smith, (2011)	I - Spline dupla II - Junta de extremidade	40 x 60 x 11,2
CITADO ²	Gravic; Fragiaco e Ceccotti (2012)	I - Half -lap	40 x 45 x 8,5
		II - Spline	25 x 45 x 8,5
			30 x 45 x 8,5 20 x 45 x 8,5
REFERENCIADO	Flatscher; Bratulic; Schickhofer (2014)	I - Half -lap	250 x 250 x 9,8 250 x 125 x 9,8
CITADO	Richardson (2015)	I- Spline	30,5 x 30,5 x 17,5
		II - Half-lap	30,5 x 45,7 x 17,5
		III - Extremidade e chapa de aço	30,5 x 60,9 x 17,5
CITADO	Hossain; Danzing; Tannert (2016)	I- Junta de Extremidade	50 x 150 x 9,9

¹ Referência analisada pela autora, não citada na revisão bibliográfica

² Referência analisada e citada na revisão

Fonte: a própria autora.

Percebe-se, na tabela 4 a variação nas dimensões dos corpos de prova. Em todos os casos os painéis são submetidos ao cisalhamento. Nos estudos não foram mencionadas as justificativas para tais dimensões, exceto nos estudos de Flatscher, Bratulic e Schickhofer (2014), em que a explicação é pautada na condicionante de transporte dos painéis.

Excluindo-se a exceção as larguras estão entre 20cm e 50cm, enquanto as alturas 45 cm e 150 cm. A menor largura, 20cm, encontrada em Gravic, Fragiaco e Ceccotti (2012), se refere aos painéis laterais e o central com 40cm ou 30cm. A maior altura, 150cm, foi assim determinada, aparentemente (não é justificado pelos pesquisadores), devido ao distanciamento do grupo de ligações em Hossain, Danzing e Tannert (2016).

Dessas referências, destaca-se a de Gravic; Fragiaco e Ceccotti (2012), pois a análise é uma parte do extenso estudo do *Progetto Sofie*, realizado no instituto de pesquisa CNR-IVALSA¹, iniciado em 2005.

Ressalta-se que as dimensões e configurações das pesquisas de Popovski, Schneider e Schweinsteiger (2010), Fragiaco, Dujic e Sustersic (2011) e Branco,

¹ *Consiglio Nazionale delle Ricerche – CNR, Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree - IVALSA*

Kekeliak e Lourenço (2015) não foram adicionadas na tabela 4, dado que estes estudos não objetivaram a análise de painéis conectados parede-parede adjacentes.

Além disso, há três configurações distintas de encaixe entre painéis parede-parede de CLT: *half-lap*, *spline* e junta de extremidade. Os resultados encontrados pelos pesquisadores (seção 2.1.2), indicam que o melhor desempenho das ligações ocorreu nas juntas *half-lap* e de extremidade.

2.4.2 Ligações em Estruturas de Madeira

Esta seção apresenta o dimensionamento e cálculos de ligações realizadas através de cavilhas, pregos e parafusos. A avaliação do desempenho das ligações é feita por meio dos seguintes requisitos:

- Resistência ao esmagamento localizado da Madeira;
- Capacidade de Resistência e Plastificação da Ligação;
- Rigidez das Ligações.

Posteriormente, na seção 2.4.3, serão discutidos os critérios utilizados para cálculos e avaliações de elementos desenvolvidos com GFRP.

2.4.2.1 Dimensionamento das Ligações

A NBR 7190 (1997) preconiza que para cavilhas com função estrutural, são admitidos os diâmetros de 16mm, 18mm e 20mm. Instaladas em orifícios pré-furados com o mesmo diâmetro, podem ser impregnadas com resina para aumentar a capacidade de resistência.

O Eurocode 5 determina que o diâmetro do pino deve ser maior que 6mm e menor que 30mm. O dimensionamento do diâmetro das cavilhas de GFRP será abordado em uma seção subsequente.

Os espaçamentos mínimos entre ligações com pinos (pregos com e sem pré-furação, parafusos e cavilhas) são determinados para evitar ou reduzir o fendilhamento da madeira. No Anexo I - A, pode ser verificados os espaçamentos de acordo com a NBR 7190 e o Eurocode 5.

2.4.2.2 Resistência ao Esmagamento Localizado da Madeira

A resistência ao esmagamento localizado da madeira é resultante do valor máximo de tensão de compressão desempenhado por um elemento rígido de ligação do tipo cavilha, que transpasse o elemento de madeira em uma determinada parte (BRANCO, 2003).

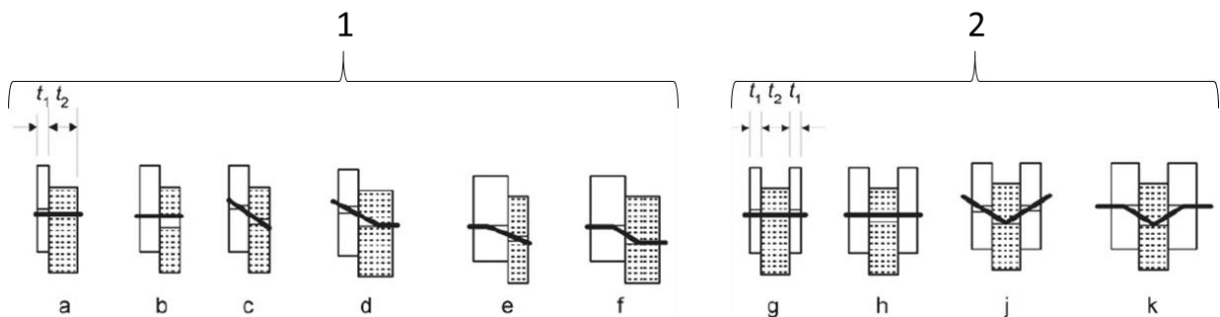
O Eurocode 5 preconiza expressões para obtenção da resistência ao esmagamento localizado, de acordo com o tipo de ligação: uma expressão para pregos, com e sem pré-furação; outra para cavilhas, de diâmetro até 30mm, na qual deve ser considerado o ângulo da ligação em relação às fibras da madeira (Anexo I – B).

2.4.2.3 Capacidade de Resistência e Plastificação da Ligação

A resistência é o principal requisito dos elementos de ligações, visto que as ligações devem ter capacidade de transmitir forças de uma peça de madeira para outra (PFEIL; PFEIL, 2008).

A capacidade da resistência da ligação pode ser relativa a um ou dois planos de corte (cisalhamento simples ou duplo). O Eurocode 5 (EN 1995-1-1, 2004) indica a metodologia de cálculo para os dois casos [Anexo I – C (C-1)].

Figura 19: Modos de ruptura – um plano de corte (a) e dois planos de corte (b).



Fonte: EN 1995-1-1, 2004.

Nas equações C-1 e C-2, do Anexo I – C (C-1), observam-se as letras de a – k. Cada expressão-letra representa um modo de ruptura, exibido na figura 19, (1) um plano de corte e (2) dois planos de corte, t_1 e t_2 indicam a espessura de cada elemento a ser conectado.

Os modos de ruptura (a), (b), (c), (g) e (h) são correspondentes a ruptura por esmagamento da madeira e se comporta como um componente rígido. Nos modos (d), (e), (f), (j) e (k), as ligações são mais esbeltas e a ruptura acontece por meio da combinação entre o esmagamento local da madeira e a plastificação da ligação (BRANCO, 2003).

Posteriormente ao teste experimental, analisa-se o modo de ruptura, segundo a classificação do Eurocode 5, para indicação da expressão adequada de cálculo da resistência da ligação [Anexo I – C (C-1)].

A NBR 7190 (1997) propõe para o cálculo de resistência de ligação, a utilização de um diagrama de força x deformação [Anexo I – C (C-2)], com os resultados obtidos no ensaio descrito na seção 2.3.2.2. O diagrama tem como base a força aplicada em um determinado corpo de prova, provocando uma deformação específica residual de 2%. Os procedimentos de cálculo encontram-se no Anexo I – C (C-2).

2.4.2.4 Rigidez das Ligações

Branco (2003) afirma que a rigidez das ligações tem papel determinante na distribuição de esforços em estruturas de madeira: quando muito rígidas, a ruptura ocorrerá nos membros e classificada como frágil.

A rigidez da ligação pode ser analisada de acordo com o módulo de deslizamento K_s (N/mm), que é encontrado por meio da equação (D-1) no Anexo I – D, disponibilizada na EN 26891 (1991), resultante do programa de ensaio descrito na seção 2.3.2.2.

No Eurocode 5, a avaliação da rigidez da ligação é determinada por outra equação que considera o módulo de deslizamento K_{ser} , em serviço, em duas condições: para pregos, parafusos e cavilhas com pré-furação e sem pré-furação nos elementos de madeira (Ver Anexo I – D).

Nesse caso, a equação não leva em consideração o desempenho da conexão de acordo com os resultados obtidos em ensaios, mas somente a massa específica dos elementos de madeira e o diâmetro do conector.

2.4.3 Critérios de Cálculo de GFRP

Esta seção apresenta os procedimentos para determinação das propriedades mecânicas de GFRP. Cabe ressaltar que esse processo de cálculo é aplicável para todos os tipos de materiais compósitos reforçados com fibras contínuas e a validação dos cálculos deve ser feita experimentalmente com base em norma específica.

2.4.3.1 Comportamento Elástico, Resistência à Tração e Cisalhamento

As respostas mecânicas dos compósitos dependem de diversos fatores, como: os comportamentos de tensão-deformação das fases (fibra e matriz), as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada (CALLISTER JR, 2002).

Sendo assim, é possível calcular previamente o desempenho do compósito, analisando os seguintes requisitos:

- Comportamento Elástico:
 - Em carregamentos Longitudinal e Transversal
- Resistência à Tração:
 - Longitudinal e Transversal
- Cisalhamento

Os cálculos a seguir são referenciados em Callister JR (2002).

Comportamento Elástico em carregamento longitudinal

No comportamento elástico com carregamento longitudinal, a rigidez é considerada a partir da carga total aplicada na peça de compósito F_c , advinda da relação entre os dois componentes: fibra F_f e matriz F_m , conforme equação 1:

$$\begin{aligned} F_c &= F_m + F_f \quad \text{ou} \\ \sigma_c &= \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \end{aligned} \quad (1)$$

Em que:

V é a fração de volume, sendo $V_c = 1$ (fração de volume total do compósito);

σ é a tensão de cada fase.

Os sufixos m , f e c referem-se a matriz, fibra e compósito, respectivamente.

Considerando que, há ligação completa entre as fases (matriz e fibra) e se ϵ é a deformação em uma fase, tem-se que a deformação do compósito é igual à da matriz, que consecutivamente é igual à da fibra:

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \quad (2)$$

Desse modo, pode-se dividir a tensão pela sua respectiva deformação:

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \quad (3)$$

Sendo assim, o módulo de elasticidade E_{cl} do compósito, na direção longitudinal é obtido pela equação 4:

$$E_{cl} = E_m (1 - V_f) + E_f V_f \quad (4)$$

Na qual:

E_{cl} é o módulo de elasticidade do compósito na direção longitudinal

E_m é o módulo de elasticidade da matriz

E_f é o módulo de elasticidade da fibra

V_f é a fração de volume da fibra.

Logo, para um carregamento longitudinal, a razão entre a força suportada pelas fibras e pela matriz é:

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (5)$$

Comportamento Elástico em carregamento transversal

No comportamento elástico, com carregamento transversal, a tensão σ na qual o compósito e ambas as fases estão expostas é a mesma:

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad (6)$$

Desse modo, a deformação total do compósito ϵ_c é:

$$\epsilon_c = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f \quad (7)$$

Sendo que, a deformação ϵ é igual a:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \rightarrow \frac{\sigma}{E_{ct}} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f \quad (8)$$

E_{ct} é o módulo de elasticidade do compósito na transversal

E_m é o módulo de elasticidade da matriz

E_f é o módulo de elasticidade da fibra.

Dessa forma, o módulo de elasticidade na direção transversal E_{ct} é encontrado por:

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f)E_f + V_f E_m} \quad (9)$$

Resistência à tração longitudinal

Considerando as características de resistência dos compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas, submetidos à aplicação de uma carga na direção longitudinal, pode-se obter o limite de resistência à tração longitudinal. A resistência é normalmente tida como sendo a tensão máxima na curva de tensão-deformação e geralmente esse ponto é correspondente à fratura da fibra, marcando o surgimento da falha do compósito.

Desse modo, é possível encontrar a resistência à tração longitudinal do compósito por meio da equação 10:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (10)$$

Nessa equação, o σ_m representa a tensão na matriz no momento em que acontece a falha da fibra e o σ_f representa o limite de resistência à tração da fibra.

As resistências dos compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas são altamente anisotrópicas, normalmente são projetados para serem carregados ao longo da direção longitudinal, de maior resistência.

Entretanto, quando os compósitos são submetidos a cargas transversais, podem ocorrer falhas prematuras, uma vez que o limite de resistência à tração na direção transversal é, em geral, extremamente baixo e em alguns casos são mais

baixos do que o limite de resistência à tração da matriz. A baixa resistência à tração na direção transversal é associada a fatores como: as propriedades da fibra e da matriz, a resistência da ligação fibra-matriz e a presença de vazios.

Cisalhamento

Callister JR (2002) não faz menção a cálculos para os compósitos submetidos a cargas transversais ou cisalhamento. Portanto, são utilizados como base teórica, os cálculos sugeridos por Hollaway (1978), em que o módulo de cisalhamento longitudinal do compósito G_c pode ser obtido pela equação:

$$G_c = G_m \frac{(1 + V_f)}{(1 - V_f)} \quad (11)$$

G_c é o módulo de cisalhamento longitudinal

G_m é o módulo de cisalhamento da fase matriz

E a tensão cisalhante do compósito σ_c é:

$$\sigma_c = \frac{G_m}{1 - V_f} \quad (12)$$

Sendo assim, percebe-se que o cálculo prévio do compósito, resulta em um panorama do desempenho desse material. As caracterizações mecânicas podem ser feitas por meio do ensaio proposto pela ASTM D 638 e aplicada nas equações apresentadas nessa seção.

2.5 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As ligações entre os painéis de CLT são alvos de investigações mundiais. Nos estudos apresentados, nota-se disparidade nas dimensões dos corpos de prova. Esse requisito é de extrema importância para realização dos ensaios mecânicos.

Portanto, diante das análises de cada investigação, citada em 2.1.2, considera-se como parâmetro para a presente pesquisa, o dimensionamento dos corpos de prova de Gravic, Fragiaco e Ceccotti (2012), posto que os pesquisadores

efetuaram um estudo extenso para diferentes configurações e de grande confiabilidade.

Outro requisito importante, é o encaixe entre as juntas dos painéis, que podem ser feitas de três formas: *half-lap*, *spline* e junta de extremidade. Dentre elas, as que apresentaram melhor desempenho das ligações, foram a *half-lap* e junta de extremidade. Além disso, o ângulo de posicionamento das ligações em relação ao plano do painel, com desempenho superior, foram as em ângulo de 45°, quando comparado as em 90°.

No que diz respeito aos GFRP, o processo de produção é a etapa na qual a cavilha será desenvolvida e a pultrusão – automatizada – deverá ser adaptada para um procedimento manual executado nessa pesquisa.

Na metodologia de ensaio obtiveram-se parâmetros necessários para o experimento, e ainda foi apresentada a modelagem paramétrica. A importância da simulação para essa pesquisa foi encontrar resultados prévios e diminuir a amplitude de possibilidades e percalços no decorrer da próxima etapa (experimento), economizando tempo e material.

Nos estudos experimentais, observou-se que no equipamento para o ensaio de ligações entre painéis CLT, hastes de apoio externas são posicionadas para evitar que o painel escorregue ou saia fora do eixo durante a aplicação da carga.

Por fim, os cálculos e dimensionamentos de ligações entre elementos de madeira foram apresentados. Entretanto, os critérios para cálculos de materiais compósitos são diferentes daqueles frequentemente realizados para ligações entre elementos de madeira. Na pesquisa, a cavilha de GFRP deve ser analisada pelos dois fundamentos, a saber de cálculo para compósitos e o de ligações para madeira.

Notou-se ainda, que na literatura não há estudos iguais ou similares ao proposto nesta pesquisa, destacando assim a originalidade do trabalho e sua importância para a contribuição acadêmica por meio do aprofundamento dos conhecimentos científicos e inovação tecnológica na construção civil.

3

MATERIAIS E MÉTODOS

Os painéis de CLT foram confeccionados com tábuas de madeira das espécies *Pinus spp.*, derivadas do desdobro de pranchas secas e armazenadas no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina (UEL), proveniente de reflorestamento.

Os procedimentos de confecção dos painéis seguiram a norma ANSI/APA PRG 320 (2012) e as camadas foram coladas com a resina fenol formaldeído, de nome comercial FF-109 da Bonardi Indústria Química e Ltda., gentilmente concedida pela empresa Compensados Ideal Ltda. de Londrina – PR.

A resina polimérica epóxi é da marca *Huntsman* (2011). O sistema é composto pela resina Araldite® LY 1564 BR e endurecedor Aradur 2963. A fibra de vidro E-CR GLASS Advantex® é da *Owens Corning*. A escolha do sistema epóxi e da fibra de vidro é justificada pelas propriedades mecânicas dos materiais (ver Anexo II).

A metodologia da pesquisa foi dividida em duas partes:

→ 1^o – *Simulação*

- Constituída por uma modelagem parasólida computacional no *software SolidWorks* e análise por elementos finitos no *software ANSYS*;

→ 2^a – *Ensaio Mecânicos*

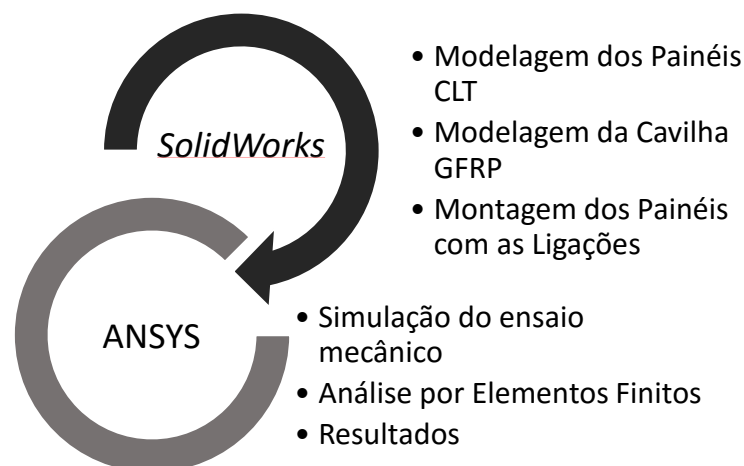
- Elaboração dos painéis de CLT;
 - Adaptação de molde para confecção das cavilhas de GFRP;
 - Mistura dos materiais: sistema Araldite LY 1564®, Aradur 2963 e fibra de vidro E-CR GLASS Advantex®;
 - Modelagem do dispositivo de ligação e desenforme;
-

- Caracterização mecânica das cavilhas de GFRP – Ensaio à tração;
- Montagem dos painéis conectados;
- Testes de cisalhamento - monotônico estático: painéis conectados com as cavilhas de GFRP.

3.1 MODELAGEM PARAMÉTRICA COMPUTACIONAL

O processo de modelagem consistiu em duas partes: a primeira foi a modelagem dos elementos de estudo no *SolidWorks* e a segunda foi a simulação dos ensaios mecânicos e análise por elementos finitos no ANSYS, chegando-se aos resultados (figura 20).

Figura 20: Etapas da modelagem paramétrica dividida por software.



Fonte: a própria autora.

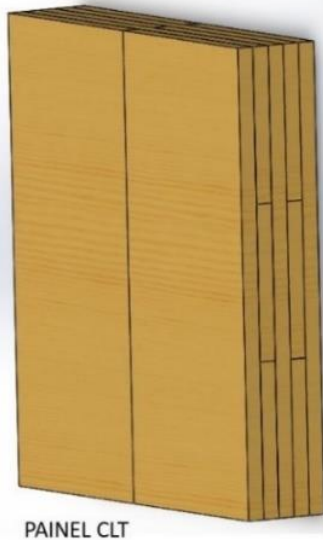
3.1.1 Procedimentos no *Software SolidWorks*

Previamente à modelagem, estipulou-se a configuração, dimensões do corpo de prova e quantidade de camadas do painel CLT de acordo com o estudo de Gravic, Fragiacomio e Ceccotti (2012), conforme a figura 7 (seção 2.1.2). Optou-se por essa determinação, visto que a referência foi também a base para os experimentos físicos.

A modelagem paramétrica foi iniciada no software *SolidWorks*, a partir do elemento de painel CLT. Primeiramente, modelou-se as camadas vertical e horizontal – compostas por lâminas de madeira maciça – separadamente. Posteriormente, em outro arquivo de montagem, unificou-se as lâminas de madeira, encostando face-face

(Figura 21). Para o *software*, a falta de espaço entre os elementos, significa a compilação de todos os membros.

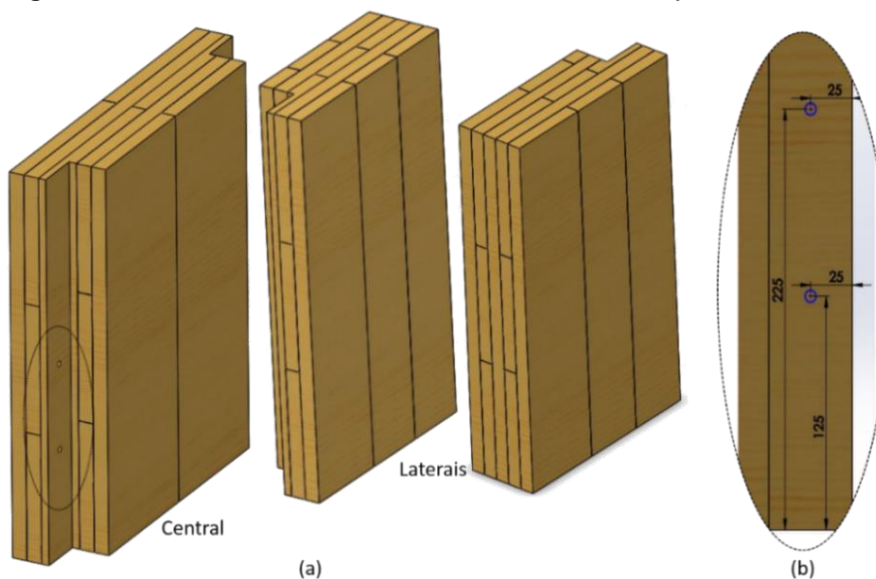
Figura 21: Modelagem do painel de CLT.



Fonte: a própria autora.

Desse modo, formaram-se os painéis laterais 25 x 45cm (largura x altura) e o central 40 x 45cm (largura x altura), com os recortes da junta *half-lap* efetuados com a ferramenta do *software*, conforme figura 22 (a). Os furos para inserção das cavilhas, foram feitos de acordo com a referência (GRAVIC; FRAGIACOMO; CECCOTTI, 2012). As distâncias das bordas e entre os furos, podem ser vistas na figura 22 (b).

Figura 22: Painéis CLT com adesivo MUF e recorte das juntas.



Fonte: a própria autora.

Na sequência, calculou-se o diâmetro da cavilha de GFRP. O diâmetro mínimo estipulado pelo Eurocode 5 para cavilhas é de 6mm. Entretanto, o diâmetro para a simulação foi definido com o processo inverso de cálculo, embasado na pesquisa de Gravic, Fragiacomio e Ceccotti (2012).

O método consistiu em se utilizar o valor de resistência do parafuso HBS 8 x 80mm de 1292N, como parâmetro. Por meio da área do parafuso: $A = \pi r^2 = 30,85\text{mm}^2$ e partindo da premissa de que a cavilha de GFRP deve apresentar o diâmetro compatível com a resistência do parafuso, pode-se afirmar que:

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \rightarrow r = \sqrt{\frac{30,85}{\pi}} \rightarrow r = 3,13\text{mm} \quad \varnothing = 6,26\text{mm} \quad (13)$$

Devido à escala de produção comercial de pinos, o diâmetro para a cavilha de GFRP de 6,26mm foi arredondado para 6,50mm. Desse modo, o dimensionamento final da cavilha de GFRP foi de: 6,50mm por 80mm de comprimento (parafuso HBS). Sendo assim, a área da cavilha é:

$$A = \pi \cdot 3,25^2 = 33,18\text{mm}^2 \quad (14)$$

Posteriormente, definiu-se o teor de fibra e do polímero na mistura. Pelo procedimento de pultrusão, visto na revisão bibliográfica, a parcela de fibra deve estar entre 40% – 70%. Na ficha técnica da fibra de vidro E-CR GLASS Advantex® a ser utilizada na pesquisa, o teor de fibra indicado é de 63%. Logo, têm-se 37% do polímero e 63% de fibra e transformou-se essas parcelas em área:

$$\text{Compósito: } A_{total} = 33,18\text{mm}^2 \quad A_{fibra} = 21\text{mm}^2 \quad A_{polímero} = 12,18\text{mm}^2$$

Seguidamente, foi necessário identificar a quantidade de *rovings* no volume. Visto que, 4000 filamentos de fibra compõem um *roving*. Sendo assim:

$$\begin{aligned} x_{filamentos} \cdot \pi \cdot r^2 &= A_f \\ x_{filamentos} &= 92519,1366 \\ y_{rovings} &= \frac{92519,1366}{4000} = 23,13 \text{ rovings} \end{aligned} \quad (15)$$

Encontrada a quantidade de *rovings* para a área total da mistura, obteve-se o volume ocupado por cada *roving*, por meio da regra de três:

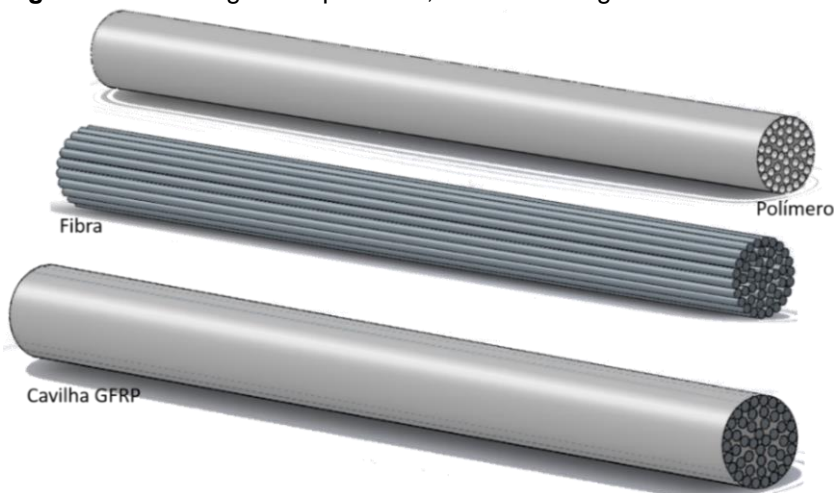
$$\begin{cases} 23 \text{ rovings} - 21\text{mm}^2 \\ 1 \text{ roving} - x \end{cases} \quad x = 0,913\text{mm}^2 \quad (16)$$

A fim de aumentar a quantidade de *rovings* na modelagem, o valor foi duplicado de 23 para 46, consecutivamente a área encontrada na equação 44, foi dividida por dois, portanto $x = 0,456\text{mm}^2$. Dessa maneira, encontrou-se ao diâmetro da unidade de *roving*:

$$r^2 = \frac{A}{\pi} \rightarrow r = \sqrt{\frac{0,456}{\pi}} \rightarrow r = 0,38120258 \quad \varnothing = 0,76240517\text{mm} \quad (17)$$

Identificado todos os parâmetros necessários, foi possível iniciar a modelagem da cavilha de GFRP. Em um arquivo, criou-se o volume do polímero e em outro o de fibra (figura 23). Nota-se, que foram modelados 46 cilindros, representando os *rovings*, conforme calculado anteriormente. No terceiro arquivo, a montagem da cavilha foi realizada (figura 23 – Cavilha GFRP).

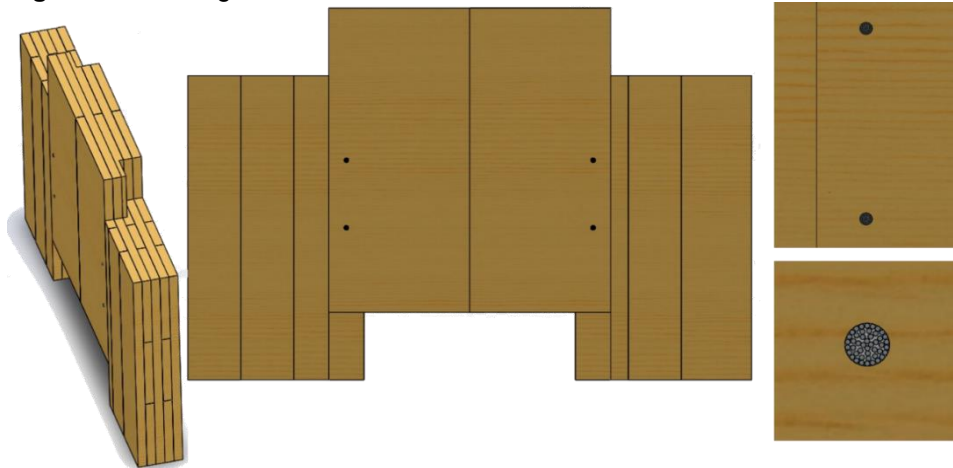
Figura 23: Modelagem do polímero, fibra e montagem da cavilha



Fonte: a própria autora.

Na sequência, outro arquivo de montagem é aberto, nele foram posicionados os painéis de CLT, nos encaixes entre as juntas e posteriormente inseriu-se as ligações (figura 24). Sucessivamente, as propriedades mecânicas foram atribuídas a cada material.

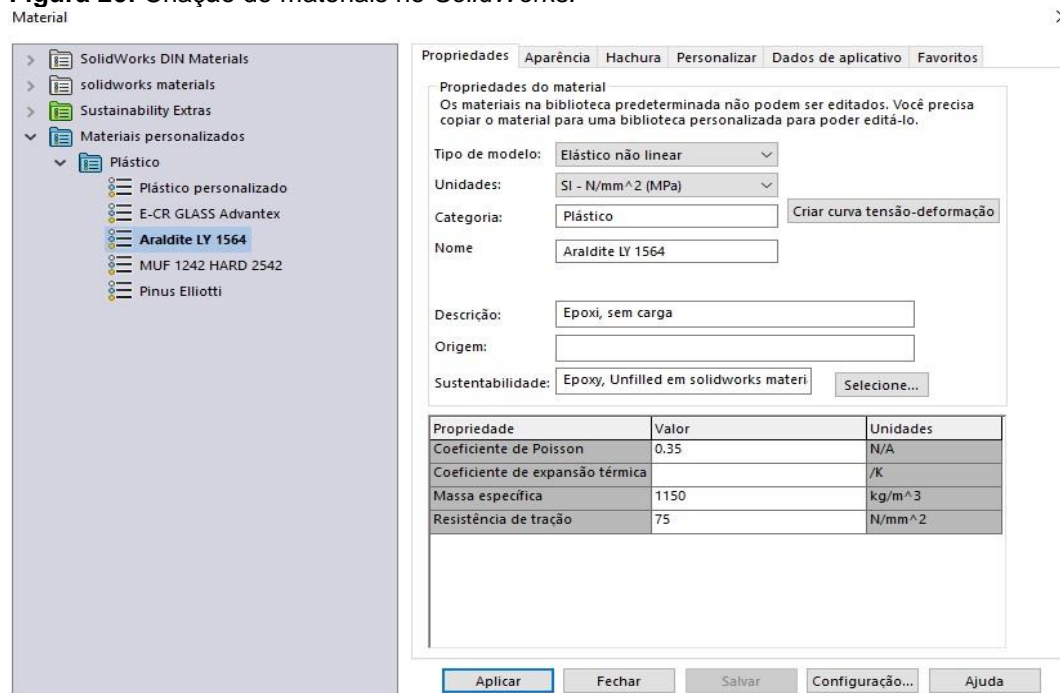
Figura 24: Montagem dos Painéis CLT conectados com cavilhas de GFRP.



Fonte: a própria autora.

Novos materiais foram criados, para cada elemento. Na figura 25 observa-se o exemplo do processo para o Araldite LY 1564, o tipo é elástico não linear e as propriedades exigidas foram: coeficiente de Poisson, massa específica e resistência à tração.

Figura 25: Criação de materiais no *SolidWorks*.



Fonte: a própria autora.

Na tabela 5, são mostradas as propriedades de todos os materiais modelados: madeira *Pinus elliotii*, Araldite LY1564/Aradur 2963 e a fibra de vidro E-CR GLASS Advantex.

Tabela 5: Propriedades dos materiais da modelagem.

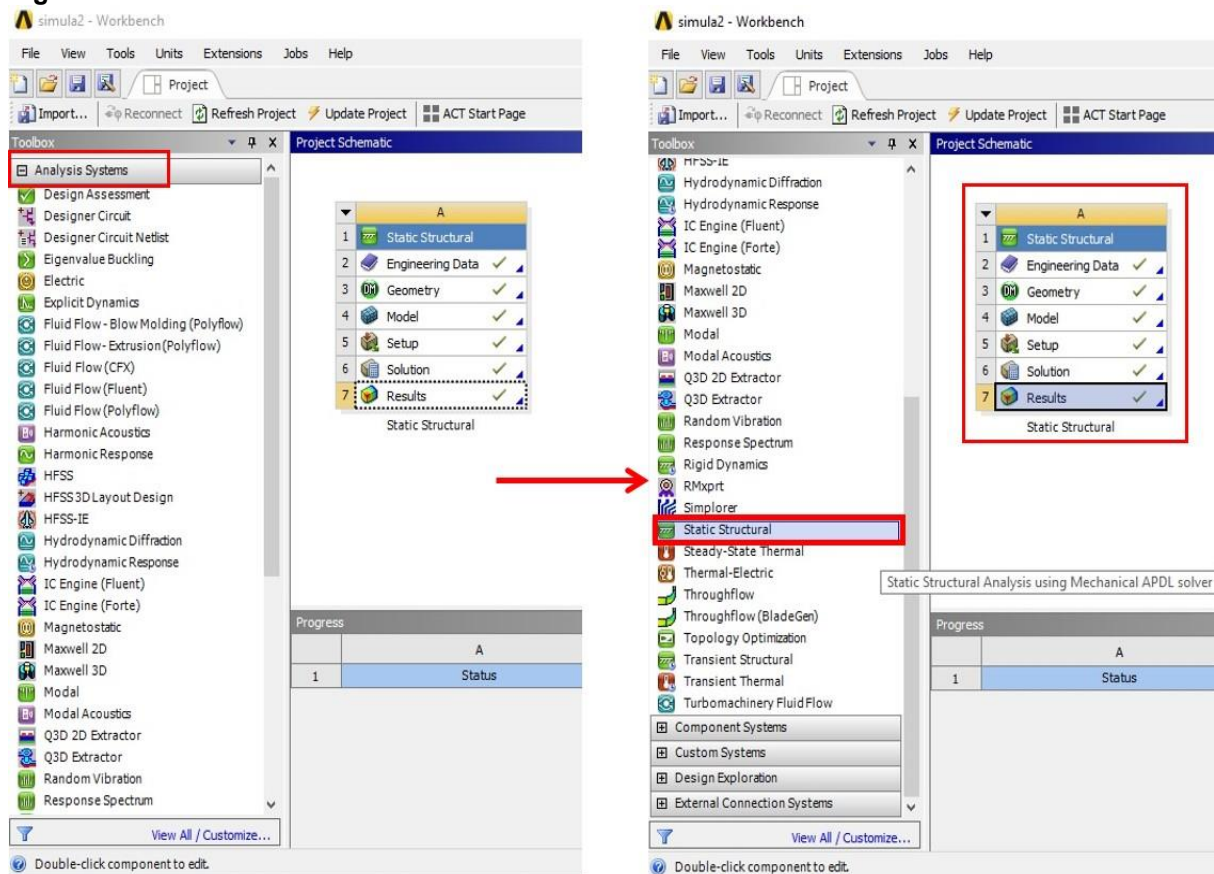
MATERIAL	PROPRIEDADES		
	COEFICIENTE DE POISSON (ν)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m^3)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (N/mm^2)
<i>Pinus elliottii</i>	0,42	480	40,4
Araldite LY1564	0,35	1160	26
Fibra E-CR GLASS	0,33	2620	1386

Fonte: PEDROSO, 2014; HUNTSMAN, 2011; OWENS CORNING, 2011.

Cabe ressaltar, que as propriedades da resina e fibra de vidro foram obtidas nas respectivas fichas técnicas, sendo assim, podem ocorrer disparidades nos resultados. No entanto, para suprir essa possibilidade, a caracterização mecânica da cavilha de GFRP foi realizada e encontra-se descrita no subtítulo 3.2.1.

3.1.2 Procedimentos no Software ANSYS

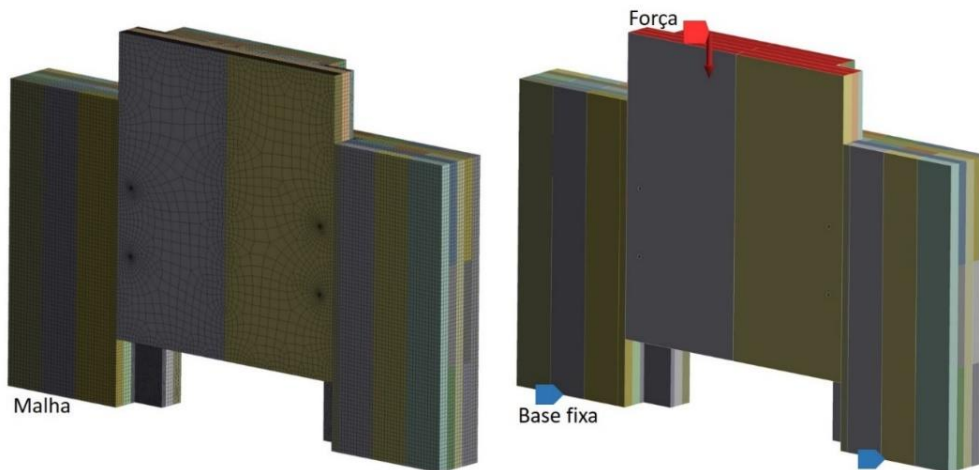
Em seguida, iniciou-se o procedimento de análise no ANSYS. Primeiramente selecionou-se o tipo de projeto de análise, que neste caso é o *Static Structural* (figura 26).

Figura 26: Área de trabalho no ANSYS.

Fonte: a própria autora.

Ao acessar o projeto de análise, é solicitada a produção da malha (figura 27). A criação da malha nos componentes modelados é gerada automaticamente pelo *software* ANSYS. Essa malha discretiza todos os elementos em matrizes matemáticas e as calcula.

Figura 27: Malha e Condições de contorno.



Fonte: a própria autora.

Em seguida, as condições de contorno foram estabelecidas: 1^a - As propriedades mecânicas dos materiais foram atribuídas (tabela 5); 2^a - Determinaram-se os elementos fixos (*software* compreende que estes não podem se mover nos eixos x, y e z); 3^a - Aplicação e sentido da força (figura 27). Por fim, gerou-se a simulação.

3.2 PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS FÍSICOS

3.2.1 Confeção das Cavilhas de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro – GFRP para Caracterização Mecânica e Ensaio

A primeira parte dos ensaios foi a confecção das cavilhas de GFRP para caracterização mecânica, segundo a ASTM D 638 (2008). O procedimento foi realizado no laboratório de materiais da Universidade Estadual de Londrina (UEL). A elaboração das cavilhas teve diversas etapas:

- Identificação de molde compatível;
- Adaptação do processo industrializado de pultrusão;

- Compatibilização do ensaio no equipamento disponível;
- Readaptação dos corpos de prova para ensaio.

O molde compatível encontrado para confecção foi um cilindro plástico da marca *Strawplast*, com aproximadamente 6mm de diâmetro e 150mm de comprimento. Em seguida, foram realizados os cálculos da equivalência de concentração de fibra e resina para o volume do molde.

O cilindro tem 4242mm³. As porcentagens de fibra e resina, conforme citado anteriormente, são de 63% e 37% respectivamente, resultando 2672,46mm³ de fibra e 1569,54 mm³ de resina.

Os materiais foram pesados em balança de precisão (centésimo de grama). Dessa maneira, os volumes de fibra e resina tiveram que ser convertidos em gramas, por meio da equação da densidade:

$$m = D \cdot V \quad (18)$$

Onde:

m = massa em gramas

D = densidade do material

V = volume do material

A densidade da fibra é de 2,62g/cm³, da resina Araldite 1,15g/cm³ e do endurecedor Aradur 1,00g/cm³. As massas calculadas foram: fibra – 7,00g; Araldite – 1,21 g e Aradur – 0,51g.

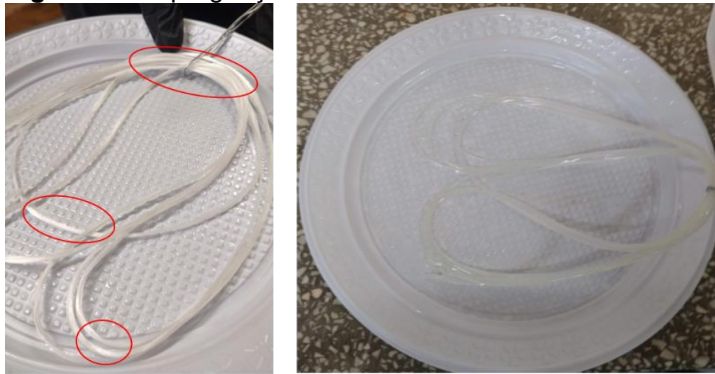
Posteriormente, ocorreram as tentativas de adaptação do processo de pultrusão. Quatro tentativas foram realizadas para se chegar à produção correta da cavilha. Nas duas primeiras, a resina não impregnou todo comprimento do volume do molde. Isso ocorreu devido alta concentração de fibra no volume, deixando pouco espaço para a penetração da resina.

Na figura 28, a marcação em vermelho indica a área na qual a resina não foi impregnada. Na primeira tentativa, a fibra foi puxada para o interior do molde e a resina inserida posteriormente pelas bordas com uma seringa, que não permitiu a impregnação total das fibras. A seringa, sem agulha, apenas liberava a resina na parte superficial do molde. Na segunda tentativa o resultado foi semelhante (figura 28).

Figura 28: Primeira e segunda tentativa de confecção da cavilha de GFRP.**Tentativa 1****Tentativa 2**

Fonte: a própria autora.

Na terceira tentativa, mergulhou-se a fibra na resina a fim de introduzir ambas no molde de uma só vez. Nesse caso, notou-se que a quantidade de resina prevista não era suficiente para a impregnação de todos os filamentos – resultando aparência esbranquiçada, conforme marcas em vermelho (figura 29 - a).

Figura 29: Impregnação da resina na fibra.

(a)

(b)

Fonte: a própria autora.

Sendo assim, na quarta tentativa, bem-sucedida, uma quantidade maior de resina que a prevista foi utilizada para banhar a fibra (figura 29 - b). O excesso de resina foi eliminado naturalmente enquanto a fibra estava sendo puxada para o interior do molde. Dessa maneira, a cavilha de GFRP pode ser confeccionada de acordo com o objetivo desejado (figura 30).

Figura 30: Quarta tentativa de confecção da cavilha de GFRP.**Tentativa 4**

Fonte: a própria autora.

Na sequência, foram confeccionadas aproximadamente 20 cavilhas para tentativas de compatibilização do ensaio no equipamento disponível. O procedimento de confecção seguiu os passos utilizados na quarta tentativa. Todos corpos de prova foram pesados. A mistura final foi a seguinte: 7,00g de fibra e 3,28g de resina, equivalente a 68,10% e 31,90%, respectivamente.

Os corpos de prova ficaram em repouso por 24h, tempo de cura estipulado na ficha técnica da *Huntsman* (2011). Na sequência, os CPs foram desenformados e etiquetados (figura 31).

Figura 31: Corpos de prova desenformados.



Fonte: a própria autora.

Em seguida, passou-se para as etapas de compatibilização do ensaio. O equipamento da marca EMIC, Máquina Universal de Ensaio modelo DL-30000, com capacidade máxima de 300kN é dividido em duas partes: célula de carga superior com capacidade de 300kN e célula de carga inferior com 20kN de capacidade.

Os primeiros testes foram realizados na parte inferior da EMIC (figura 32 - a). O jogo de mordentes utilizados era para corpos de prova de seção circular de $\varnothing 3\text{mm}$ a $\varnothing 8\text{mm}$ e ensaio à tração. Entretanto, após algumas tentativas, notou-se que os corpos de prova cisalhavam no local em que a os mordentes estavam comprimindo (figura 32-b).

Figura 32: Corpo de prova na parte inferior da EMIC (a). Cisalhamento do corpo de prova na área do mordente.



Fonte: a própria autora.

Assim, a fim de se utilizar outro tipo de jogo de mordentes, alguns corpos de prova foram testados na parte superior do equipamento. Nessa parte outro fenômeno ocorreu: as extremidades dos corpos de prova escorregaram dos mordentes, impossibilitando a conclusão do ensaio. Esse fato deu-se devido a geometria dos mordentes (figura 33).

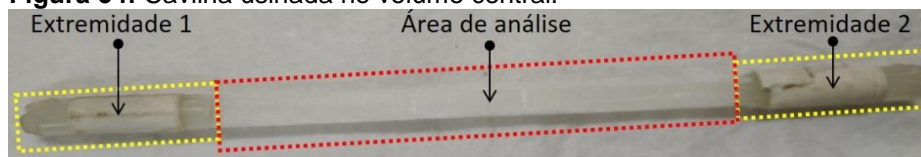
Figura 33: Corpo de prova na parte superior: escorregamento nos mordentes.



Fonte: a própria autora.

Na terceira tentativa, o volume central da cavilha foi usinado, ficando com a configuração semelhante à preconizada pela ASTM D638: área na qual os mordentes comprimem com $\varnothing 6\text{mm}$ e área de análise com aresta de aproximadamente 4,5mm (figura 34).

Figura 34: Cavilha usinada no volume central.



Fonte: a própria autora.

O procedimento de usinagem da cavilha removeu parte do material no volume central por lixamento, resultando em uma área com arestas planas, conforme o corte b na figura 35, ao passo que, nas extremidades o corpo de prova foi mantido com a volumetria original (corte a- figura 35).

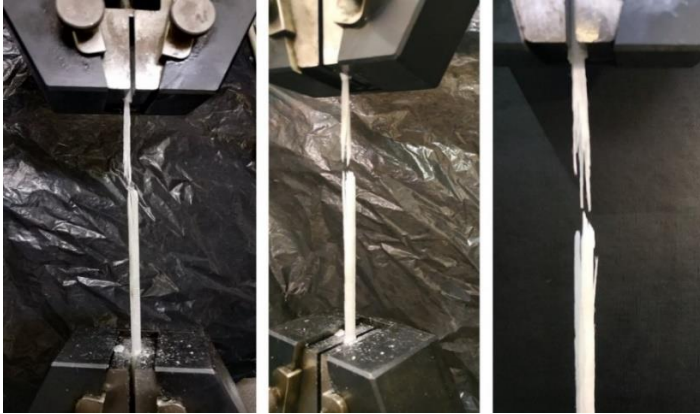
Figura 35: Detalhes da usinagem do corpo de prova.



Fonte: a própria autora.

Esse corpo de prova foi ensaiado na parte inferior do equipamento. Na configuração, a ruptura do corpo de prova aconteceu ao longo do comprimento livre, conforme exibido na figura 36.

Figura 36: Ruptura do corpo de prova usinado.



Fonte: a própria autora.

Contudo, a usinagem da cavilha após a cura não é indicada, devido a possíveis comprometimentos do desempenho estrutural do material. Como consequência, para evitar o problema, as extremidades dos CPs com $\varnothing 6\text{mm}$, nas quais os mordentes comprimem, foram engrossadas.

Nesta etapa, dois CPs foram preparados e a fim de melhorar a uniformidade, um deles foi torneado e o outro lixado para obtenção de superfície plana. O diâmetro do torneado ficou com 12mm e o lixado com altura de 12mm – medidas compatíveis com os mordentes (figura 37).

Figura 37: Corpos de prova com extremidades engrossadas.



Extremidades planificadas

Fonte: a própria autora.

Sendo assim, tentou-se realizar o ensaio na parte inferior da prensa. Todavia, os CPs não romperam devido a limitação de carga da célula inferior, com capacidade de 20kN, levando a utilização da parte superior.

A tentativa com os mordentes superiores também falhou, já que também ocorreu o escorregamento dos CPs, devido a geometria dos mordentes. A partir disso, o corpo de prova precisou ser readaptado.

Por conseguinte, um molde diferente para produção das cavilhas foi utilizado: um cilindro plástico de aproximadamente $\varnothing 4\text{mm}$ – para a área de análise – e outro cilindro plástico com $\varnothing 6\text{mm}$, para as extremidades onde os mordentes atuariam (figura 38).

Figura 38: Readaptação da confecção das cavilhas.

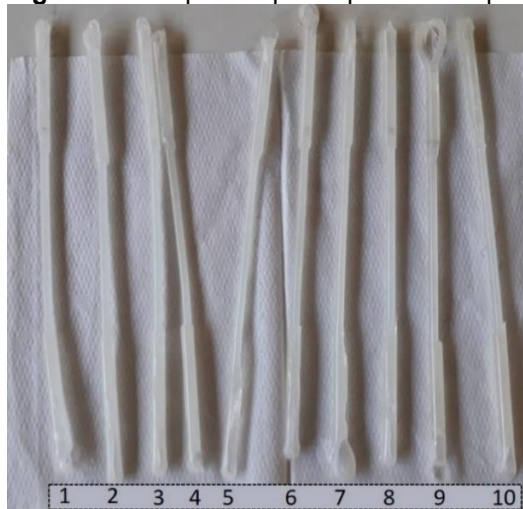


Fonte: a própria autora.

A confecção seguiu as orientações da ASTM D 638 (figura 18), apesar das recomendações serem destinadas a corpos de prova com superfície plana, as medidas foram respeitadas, ajustando-se o volume.

Dez corpos de prova foram confeccionados para os testes preliminares 1- T1 (figura 39). Todos os corpos de prova passaram pelos processos de produção “padrão”: pesagem da fibra de vidro, dosagem da resina e cura de 24h.

Figura 39: Corpos de prova para testes preliminares 1 – T1.



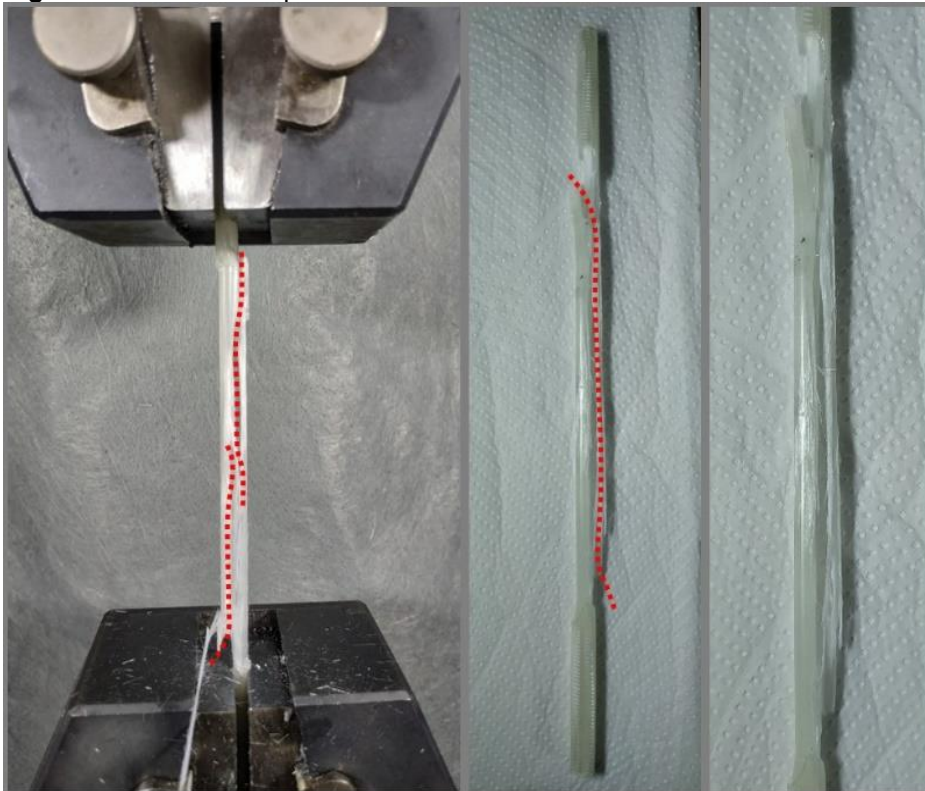
Fonte: a própria autora.

Além disso, as medidas do diâmetro das extremidades e comprimento, assim como o diâmetro e comprimento da área de análise, foram registrados (Apêndice I-T1).

O ensaio dos CPs-T1 na parte inferior da prensa foi bem-sucedido. A ruptura dos corpos de prova aconteceu ao longo do eixo longitudinal da área de análise. O ensaio possibilitou a identificação de alguns parâmetros:

- ✓ As extremidades dos corpos de prova devem ser confeccionadas com 4cm de comprimento, cuja dimensão é a área de contato dos mordentes com a cavilha.
- ✓ A qualidade mecânica dos corpos de prova estava relacionada com a aparência externa da cavilha, ou seja, é possível efetuar a classificação visual. Os corpos de prova com a superfície isenta de bolhas, arranhões, ou no caso das extremidades, volume com acabamento perfeito, tiveram desempenho maior do que as com imperfeições.
- ✓ Conforme a força de tração é aplicada, nota-se que a cavilha na área de análise começa a apresentar marcas esbranquiçadas – indicação de que os filamentos da fibra estavam sendo tracionados e logo em seguida ocorria a ruptura;
- ✓ A ruptura, por sua vez, não aconteceu no centro da cavilha ou em um único ponto, foi ao longo do eixo longitudinal (conforme marcações em vermelho na figura 40), visto que vários filamentos rompem em partes distintas.

Figura 40: Modo de Ruptura das cavilhas de GFRP.

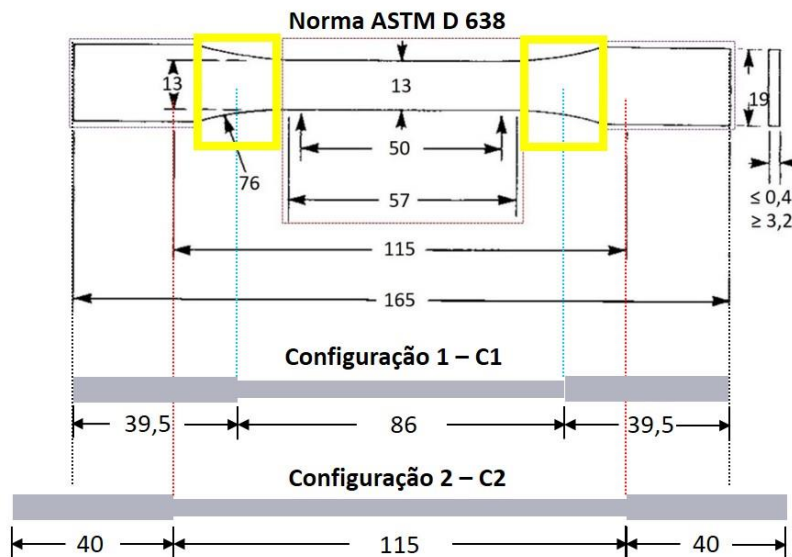


Fonte: a própria autora.

Desse modo, a fim de verificar os parâmetros acima e confirmar a compatibilização do ensaio no equipamento, foram confeccionados mais 18 CPs – teste preliminar 2-T2. Para essa confecção, 9 CPs tiveram as dimensões como as do T1 e 9 CPs outra variação das dimensões da ASTM D 638.

Na figura 41, apresentam-se estas duas configurações de corpos de prova, comparadas a recomendação da norma. As medidas da C1 são equivalentes aos corpos de prova utilizados no T1.

Figura 41: Dimensões das configurações ajustadas segundo a ASTM D 638.



*Medidas em milímetros

Fonte: a própria autora.

Para a configuração C2, a área de análise teve a medida de 115mm e as extremidades, que deveriam ter 25mm cada, foram aumentadas para 40mm, pois o comprimento do mordente tem essa dimensão (figura 41). As medidas finais dessa confecção encontram-se no Apêndice I – T2.

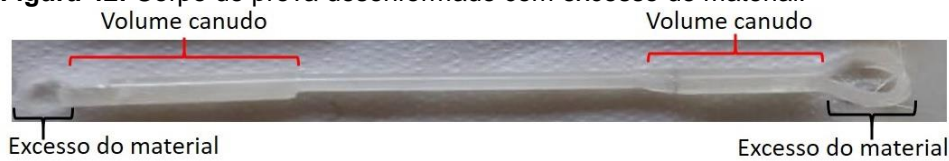
A elaboração de duas variações teve a finalidade de averiguar se haveria diferenças nos resultados do ensaio prévio. Sendo assim, novamente foram feitos os ensaios. Os resultados mostraram-se mais promissores na configuração C2, com média da força máxima de 7,87kN, enquanto na C1, obteve-se média de 7,53kN.

Portanto, identificados os padrões e a compatibilidade no equipamento de ensaio, foram confeccionados os corpos de prova para o ensaio final da caracterização das cavilhas de GFRP.

A ASTM D 638 estipula dez corpos de prova, sendo 5 para análise na seção transversal e mais cinco para avaliação longitudinal. Entretanto, a locação de dois extensômetros (*strain gage*) em cada corpo de prova, um para cada direção (transversal e longitudinal), permite cinco CPs.

Dessa maneira, partindo-se da premissa de classificação visual, foram produzidas 11 cavilhas com a configuração C2. Antes do processo de cura os corpos de prova foram pesados. Desenformados, foi removido o excesso do GFRP que fica fora do molde com uma serra circular (figura 42).

Figura 42: Corpo de prova desenformado com excesso de material.



Fonte: a própria autora.

Em seguida, com o paquímetro mediu-se: comprimento total do volume, comprimentos e diâmetros das extremidades 1 e 2, e comprimento e diâmetro da área de análise. Além disso, as cavilhas foram pesadas após a cura com e sem excesso de material (Apêndice I).

Figura 43: Corpos de prova selecionados para ensaio final de caracterização das cavilhas de GFRP.

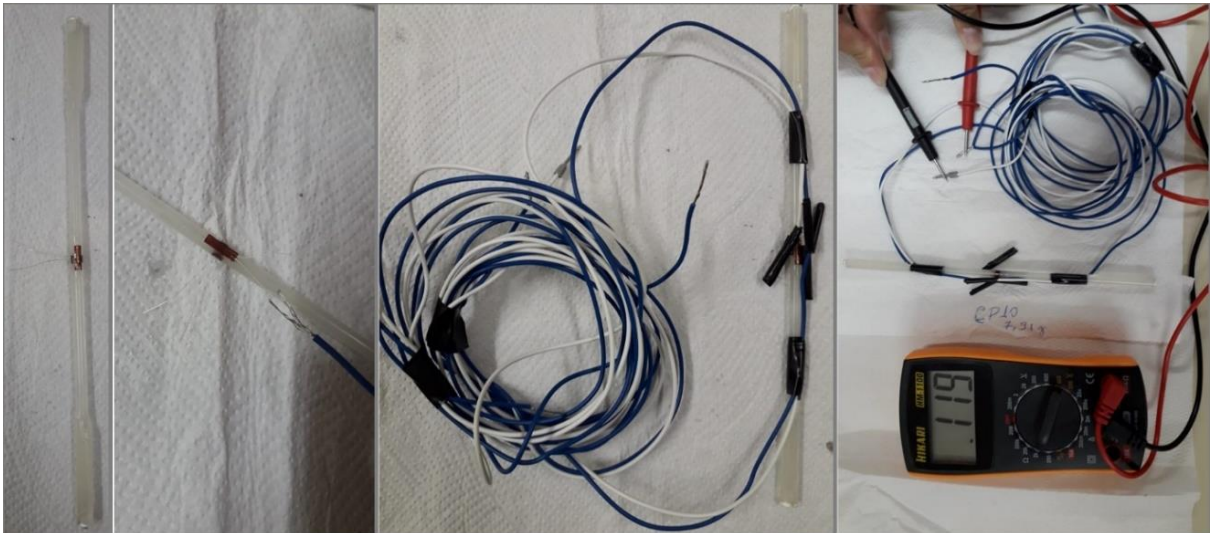


Fonte: a própria autora.

Logo, por meio da classificação visual, selecionaram-se os 6 melhores CPs – 5 unidades para análise (figura 43) e 1 gêmeo para possíveis imprevistos. Na sequência, os extensômetros foram colados com adesivo base de cianoacrilato.

Os *strain gages* utilizados foram da marca *Kyowa Strain Gages*, modelo KFGS-5-120-C1-11. Após a secagem do adesivo, dois fios foram aplicados nos terminais de contato dos *strain gages* com auxílio de fita isolante (figura 44).

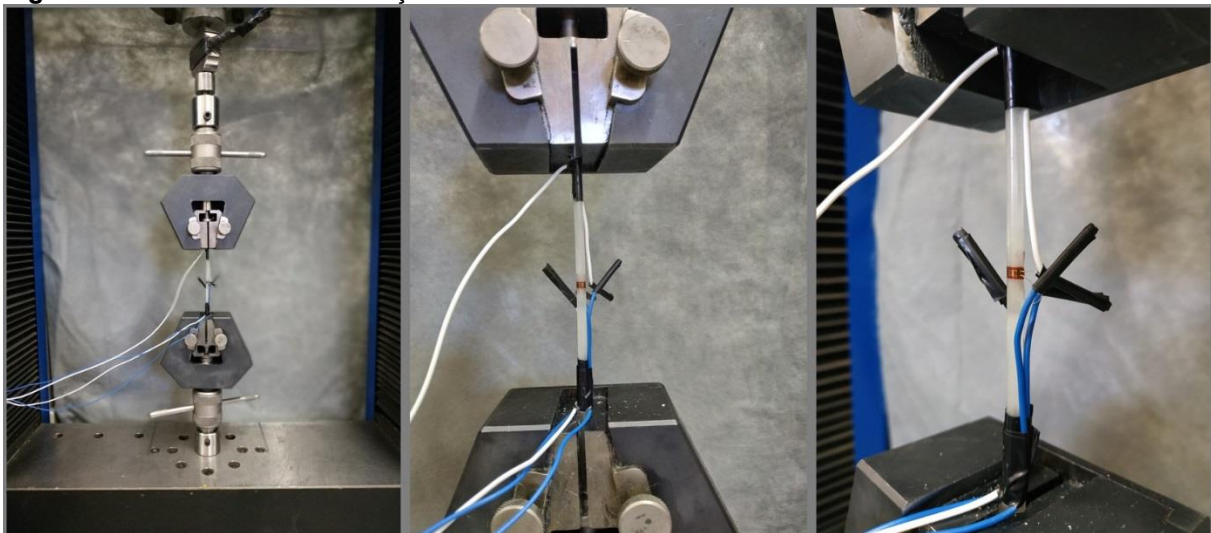
Figura 44: Procedimento de colagem dos extensômetros, fixação dos fios e teste com multímetro digital.



Fonte: a própria autora.

Com o intuito de testar o funcionamento dos extensômetros, através de um multímetro digital da marca Hikari modelo HM-1100, mediu-se a resistência elétrica, que segundo a ficha técnica do extensômetro é de $119.8 \Omega \pm 0.2\%$ (figura 44).

Figura 45: Ensaio de caracterização das cavilhas de GFRP.



Fonte: a própria autora.

Em seguida, posicionou-se o CP no equipamento. Os fios foram conectados ao Sistema de Aquisição e Análise de Sinais – AqDados 7.02 da LYNX e colados com fita próximos as extremidades, evitando a movimentação. Desse modo, deu-se início ao ensaio de caracterização das cavilhas de GFRP (figura 45).

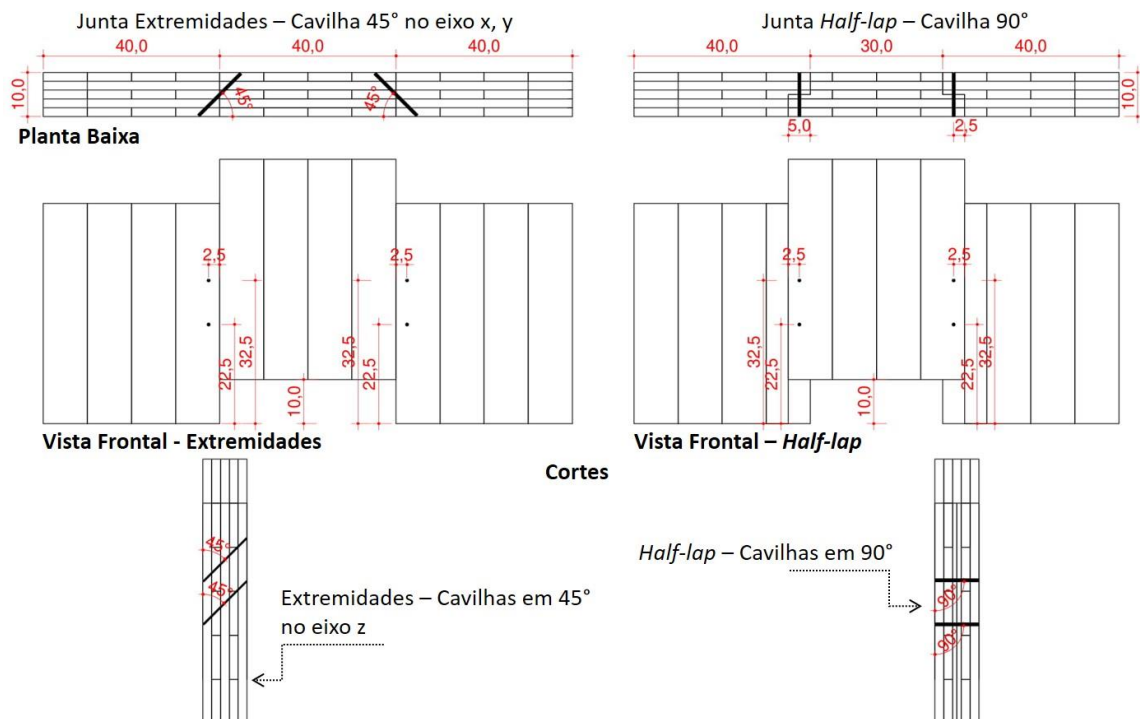
3.2.2 Elaboração dos Painéis de CLT

A elaboração dos painéis depende de duas condições: a primeira é a definição da configuração das juntas de encaixe, o posicionamentos e locações das cavilhas de GFRP; e a segunda, a quantidade e dimensões dos corpos de prova.

As configurações das juntas de encaixe e o sentido do posicionamento das cavilhas foram definidos de acordo com a revisão de literatura. As juntas de extremidade tiveram melhores resultados, quando as ligações foram posicionadas a 45° em relação ao plano.

Entretanto, a configuração mais comum é a *half-lap*, com ligações a 90°. Então, adotou-se para os testes as juntas *half-lap* e de extremidade, com as cavilhas a 90° e 45° em relação ao plano, respectivamente, conforme ilustrado na figura 46.

Figura 46: Configurações para os testes experimentais. (1) Half-lap, ligação a 90°, (2) Extremidade, ligação 45°.



Fonte: a própria autora.

Quanto à amostragem, segundo a NBR 7190 (1997), “para a caracterização mínima da resistência de uma ligação, cada amostra deve ter pelo menos seis corpos de prova”. Portanto, foram definidos 7 corpos de prova para cada configuração, sendo um deles utilizado para determinação da força máxima do ensaio, conforme EN 26891.

Logo, para cada corpo de prova serão necessários três painéis, conforme a referência (GRAVIC; FRAGIACOMO; CECCOTTI, 2012). Assim, foram confeccionadas 42 unidades de painéis.

As dimensões dos painéis utilizadas por Gravic, Fragiacomio e Ceccotti (2012), determinadas como base para a simulação, também foram inicialmente estipuladas para os testes experimentais. Entretanto, por uma questão de aproveitamento de matéria-prima, as dimensões dos painéis laterais e centrais foram definidos com 40x50cm (Largura x Altura.).

Para confecção dos painéis de CLT, foram necessárias 80 pranchas de madeira das espécies *Pinus spp.*, com aproximadamente 5 cm de espessura e 3 m de comprimento. As tábuas passaram pelos seguintes processos:

- Classificação Visual;
- Medição do Teor de Umidade;
- Ensaio de Ultrassom;
- Classificação estrutural mecânica não destrutiva.

A classificação visual seguiu o Manual de Classificação Visual de Peças Estruturais de Madeira tipo *Pinus* de Moura et al. (2012). O teor de umidade foi obtido com o higrômetro DUC 2050L, marca *Digisystem* e medida em três pontos das peças: extremidades e centro (centro da face superior).

Para o ensaio de ultrassom o equipamento utilizado foi o da marca *Agricel*, modelo USLab, com potência de 700V, transdutores com encapsulamento metálico, frequência aproximada de 45kHz e medidas do tempo de propagação de ondas em microssegundos (μ s). Os transdutores foram posicionados no centro da espessura, nas extremidades das peças. Com o resultado do ensaio de ultrassom pode-se calcular o Módulo de Elasticidade Dinâmico – MOE_d .

A classificação mecânica estática não destrutiva das peças foi embasada na ASTM D 4761 (2002). As peças foram dispostas em dois cavaletes, com

distanciamento de 2,40m. No centro das peças, uma força de 5kg foi aplicada e medida a flecha para determinação do Módulo de Elasticidade Estático – MOE_e .

Para o agrupamento das peças de madeira, em cada painel, adotou-se o MOE_e . Os painéis tiveram as médias dos MOE_e com valores aproximados. As tábuas foram cortadas nas dimensões determinadas e separadas em lotes.

Posteriormente, os painéis foram montados e colados com a resina fenol formaldeído, FF-109, nas instalações da empresa Compensados Ideal Ltda., onde também foram prensados, em prensa aquecida a 125°C, temperatura necessária para cura da resina FF-109 (conforme especificação do material).

Em seguida, ao retornarem para o laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina (UEL), os painéis passaram por esquadreamento (Apêndice II).

3.2.3 Elaboração dos Corpos de Prova

A elaboração dos corpos de prova iniciou-se pelo corte das juntas *half-lap* em 21 painéis (figura 47). Para as juntas de extremidade, nenhum recorte foi necessário.

Figura 47: Painéis com junta *half-lap*.



Fonte: a própria autora.

Desse modo, agruparam-se três painéis para formação de um corpo de prova. O agrupamento dos painéis consistiu em: painel 1 + painel 2 + painel 3 = Corpo de Prova A – CPA para as juntas do tipo *half-lap* (T-2), painel 22 + painel 23 + painel 24 = Corpo de Prova 1 – CP1 para as juntas de extremidade (T-1) e assim por diante, conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6: Agrupamento dos painéis para formação dos corpos de prova.

Configuração	Tipo de Junta	Painéis Agrupados	Código - Corpo de Prova
T1	<i>Extremidade</i>	22 + 23 + 24	CP1
		25 + 26 + 27	CP2
		28 + 29 + 30	CP3
		31 + 32 + 33	CP4
		34 + 35 + 36	CP5
		37 + 38 + 39	CP6
		40 + 41 + 42	CP7
T2	<i>Half-lap</i>	1 + 2 + 3	CPA
		4 + 5 + 6	CPB
		7 + 8 + 9	CPC
		10 + 11 + 12	CPD
		13 + 14 + 15	CPE
		16 + 17 + 18	CPF
		19 + 20 + 21	CPG

Fonte: a própria autora.

Na sequência, foram confeccionadas as cavilhas de GFRP. Em cada corpo de prova foram utilizadas quatro cavilhas para conexão, de acordo com a referência Gravic, Fragiaco e Ceccotti (2012), resultando em 56 cavilhas. Uma quantidade extra foi confeccionada, totalizando 72 cavilhas (figura 48).

Figura 48: Processo de confecção das cavilhas para ensaio de ligação.

Fonte: a própria autora.

A produção das cavilhas está descrita no tópico 3.2.1. As cavilhas foram pesadas e ficaram com composição final de 7,00g de fibra e 4,04g de resina,

equivalente a 63,41% e 36,59%, respectivamente (Apêndice III). Após a cura de 24h, as cavilhas foram desenformadas e classificadas visualmente.

Foram selecionadas as cavilhas isentas de defeitos e retirados os excessos das extremidades com a serra circular. Na figura 49 encontram-se as cavilhas prontas para as ligações dos painéis de CLT.

Figura 49: Cavilhas para o ensaio de ligações entre painéis de CLT.



Fonte: a própria autora.

Posteriormente, verificou-se o diâmetro da broca para pré-furação dos painéis. Sendo assim, foi feito um furo com broca de $\varnothing 6,5\text{mm}$ e outro com $\varnothing 6\text{mm}$ em um recorte do painel de CLT. Da furação executada a que melhor se ajustou foi a de $\varnothing 6\text{mm}$ (figura 50).

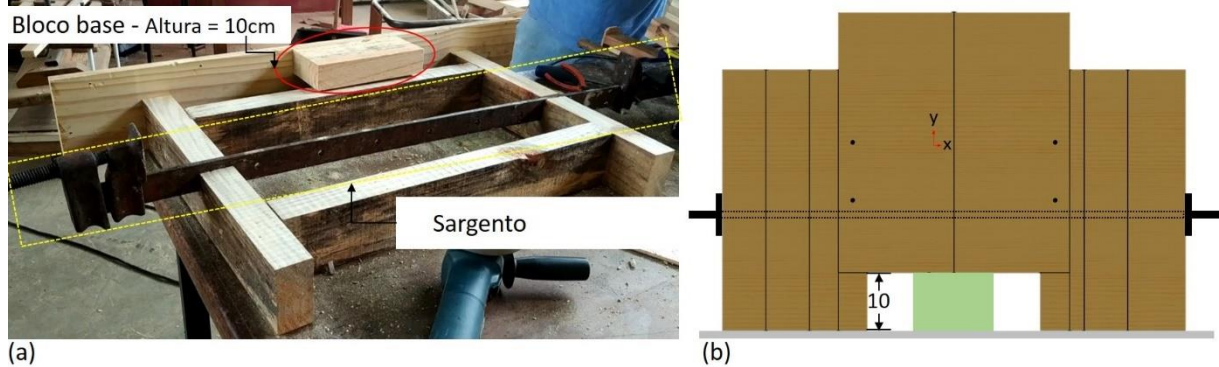
Figura 50: Teste de pré-furação das cavilhas de GFRP.



Fonte: a própria autora.

Dessa maneira, realizou-se a preparação para a pré-furação dos corpos de prova. Para tal, foi feito um suporte em madeira, no qual havia um pequeno bloco com 10 cm de altura, para distanciamento da base do painel do central (figura 51 - b), conforme marcação em vermelho na figura 51 - a.

Figura 51: Suporte para pré-furação dos painéis de CLT.

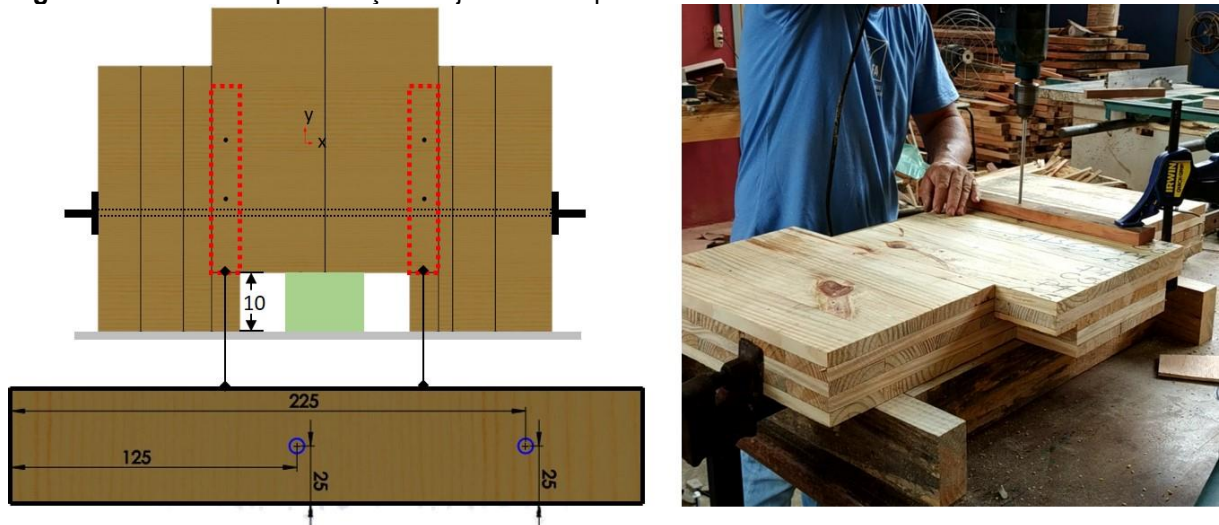


Fonte: a própria autora.

Além disso, um sargento para manter os painéis unidos foi posicionado para evitar espaçamento entre as juntas (figura 51). Em seguida, foram feitos dois gabaritos de pré-furação e deu-se início ao processo.

O primeiro gabarito de madeira com dois furos dimensionados para pré-furação das juntas half-lap era colocado nos alinhamentos da base e da lateral do painel central, um segundo sargento foi locado para evitar a movimentação do gabarito. Dessa maneira, com uma furadeira executava-se a furação (figura 52).

Figura 52: Gabarito e pré-furação da junta half-lap.



Fonte: a própria autora.

Em paralelo, as quatro cavilhas estavam sendo preparadas para inserção nos furos. As cavilhas foram banhadas na resina (Aradilte LY1564 + Aradur2963) a fim de solidarizar a cavilha no furo (figura 53).

Figura 53: Processo de preparação das cavilhas para inserção nos furos dos painéis.



Fonte: a própria autora.

Na figura 53 encontra-se registrado a colocação da cavilha no furo, duas cavilhas inseridas (marcação em vermelho) e um furo sem a cavilha (marca em amarelo). Realizou-se o processo de inserção das cavilhas com os painéis ainda posicionados no suporte com o sargento.

Devido ao pré-furo ter o mesmo diâmetro das cavilhas, foi necessário utilizar um martelo para inseri-las. Com objetivo de protegê-las, um pequeno bloco de madeira com furo foi utilizado, conforme exibido na figura 54.

Figura 54: Inserção da cavilha no pré-furo dos painéis.



Fonte: a própria autora.

Posteriormente, visto que as cavilhas têm comprimento maior que a espessura dos painéis com a junta *half-lap*, parte do volume delas ficou saliente e foi seccionado com uma esmerilhadeira angular (figura 55).

Figura 55: Recorte dos volumes das cavilhas.



Fonte: a própria autora.

Desse modo, os sete corpos de prova da configuração T2 com junta *half-lap* foram elaborados. Na figura 56 exibe-se um corpo de prova desta configuração, conectado com as cavilhas a 90° em relação ao plano.

Figura 56: Corpo de prova com junta half-lap.



Fonte: a própria autora.

Em seguida, foram realizados os mesmos procedimentos para a configuração T1 - junta de extremidade. No caso, utilizou-se outro gabarito para pré-furação, com a angulação de 45° no eixo x, y e 45° no eixo z. Iniciou-se a furação com o gabarito fixado através de sargento (figura 57).

Figura 57: Processo de pré-furação do corpo de prova da junta de extremidade.



Fonte: a própria autora.

Os espaçamentos entre os furos, distâncias das bordas e da base dos painéis foram iguais as da configuração T2. As cavilhas foram cravadas como já descrito (figura 58).

Figura 58: Inserção das cavilhas no corpo de prova com junta de extremidade.



Fonte: a própria autora.

Foram executados os 7 corpos de prova com juntas de extremidade e um gêmeo para ajustes de ensaio. Após concluídos, os corpos de prova foram deixados sob uma bancada com as faces repousadas, a fim de evitar o esforço das ligações com o peso próprio dos painéis centrais (figura 59).

Figura 59: Corpos de prova concluídos.



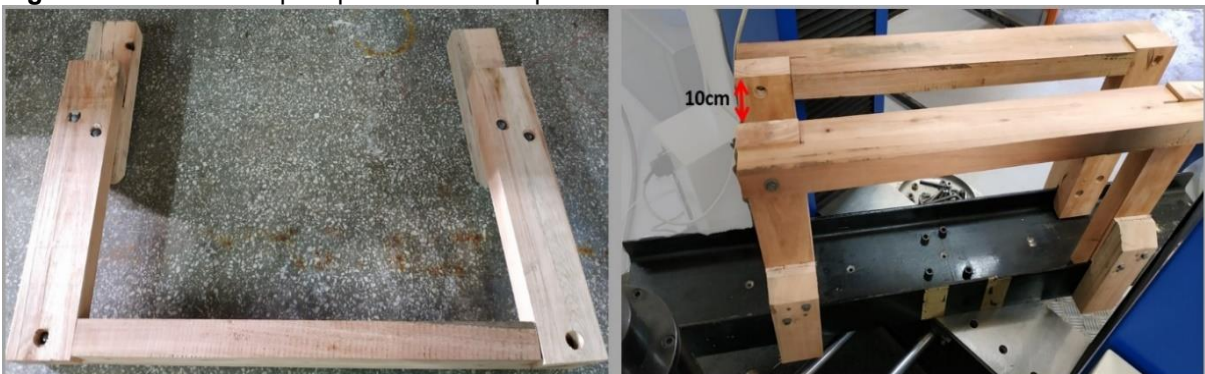
Fonte: a própria autora.

No empilhamento dos CPs em blocos, uma folha de papel foi colocada entre eles, prevenindo o contato residual da resina ainda não curada. Assim, foi finalizada a elaboração dos corpos de prova para o ensaio.

3.3 ENSAIOS MECÂNICOS – LIGAÇÕES DOS PAINÉIS CLT

A preparação do ensaio mecânico seguiu recomendações encontradas nas revisões da literatura. Assim, duas hastes de madeira foram confeccionadas e posicionadas na viga-base de aço, onde seria locado o corpo de prova, de modo que o espaçamento entre elas era de 10cm – espessura máxima dos painéis (figura 60).

Figura 60: Hastes de apoio para ensaio dos painéis.



Fonte: a própria autora.

As hastes – segundo referências bibliográficas analisadas – evitam a rotação dos painéis no eixo “y” durante o ensaio. Logo, colocou-se o corpo de prova gêmeo com junta de extremidade na viga-base de ensaio.

Um relógio comparador para medir o deslocamento foi parafusado próximo a base do painel central, conforme estipulado pela EN 26891 (1991). Sobre o painel do centro, uma chapa de aço e um bloco foram dispostos para distribuição da força aplicada (figura 61).

Figura 61: Corpo de prova gêmeo posicionado



Fonte: a própria autora.

Em seguida, determinou-se como Força Máxima Estimada - F_{est} 15kN, conforme revisão da literatura. Assim, obedecendo o gráfico de força-deslocamento da EN 26891 (1991) (figura 16, tópico 2.3.2.2), 40% da força estimada deve ser aplicada em um intervalo de 2min., mantida 30s e descarregada até 10% no mesmo intervalo de tempo, mantida 30s e carregada até a força máxima estimada ou até atingir 15mm de deslocamento.

Com base na F_{est} , 40% equivalem a 6kN, entretanto ao atingir aproximadamente 1,5kN, o ensaio foi interrompido automaticamente devido a configuração do equipamento que fixava deslocamento máximo de 15mm da célula de carga. Porém, o relógio comparador ainda não havia atingido esse deslocamento.

Notou-se, então, que o deslocamento da célula de carga era divergente do deslocamento real do painel. Logo, se procedeu ao ajuste na rotina de ensaio, permitindo deslocamento livre da célula de carga e diminuição da sensibilidade.

O ensaio foi novamente iniciado, com o corpo de prova gêmeo, já que este não havia sido rompido. Neste caso, ao atingir 30% da F_{est} , o deslocamento alcançou os 15mm no relógio comparador.

Nessa configuração de CP, a Força Máxima F_{max} observada foi de aproximadamente 5kN, contudo, os painéis laterais apresentaram deslocamento no eixo “x”; no qual não havia dispositivo de impedimento de deslocamento (figura 62).

Figura 62: Abertura lateral dos painéis no ensaio.



Fonte: a própria autora.

Passou-se, então, para o ensaio do primeiro corpo de prova da junta de extremidade - CP1-T1 com as adaptações necessárias. Posicionou-se o CP1-T1 na viga-base, colocando-se na parte superior dos painéis laterais um sargento e nas bases blocos de madeira fixado na base de aço, com intuito de travamento dos painéis no eixo “x” (figura 63).

Figura 63: Configuração do ensaio adaptações.



Fonte: a própria autora.

Uma chapa fina metálica foi parafusada no painel central, para instalação do relógio comparador a fim de medir o deslocamento vertical (figura 63). Na sequência, iniciaram-se os ensaios dos corpos de prova T2 – junta *half-lap* (figura 64).

Figura 64: Configuração do ensaio das juntas *half-lap*.



Fonte: a própria autora.

No CPA-T2 observou-se aumento significativo da carga de ruptura (10kN), que demandou ajustes na rotina de ensaio do equipamento. Os ensaios seguiram o mesmo protocolo utilizado para os CPs-T1.

4

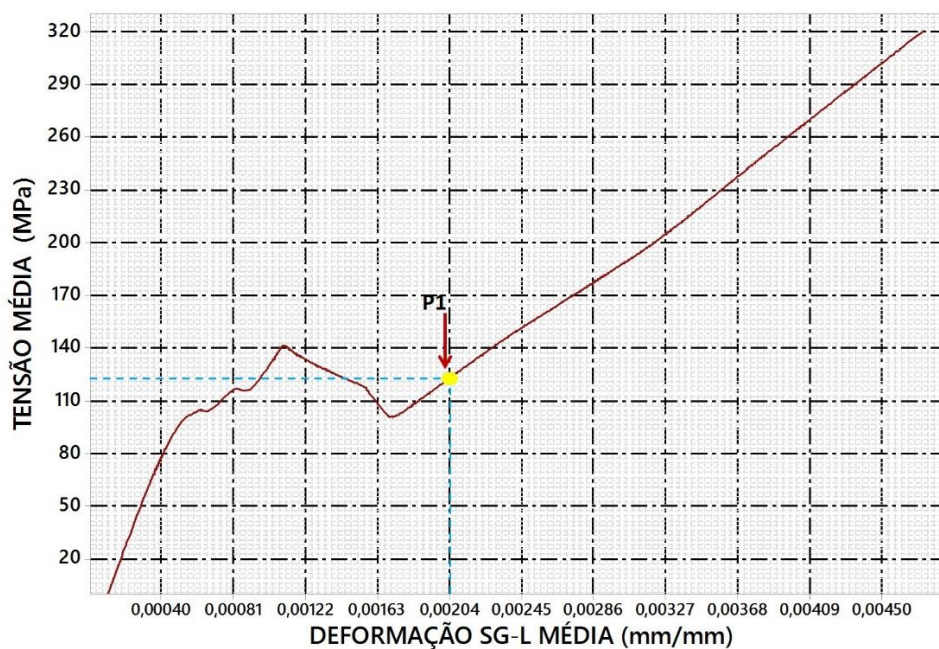
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos para caracterização mecânica das cavilhas de GFRP, da modelagem paramétrica computacional e do ensaio das ligações cavilhadas GFRP entre painéis de CLT.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CAVILHAS DE GFRP

O ensaio de caracterização das cavilhas de GFRP com os extensômetros longitudinal e transversal resultou nos gráficos de tensão-deformação média dos cinco corpos de prova analisados.

Figura 65: Gráfico de tensão-deformação média longitudinal.



Fonte: a própria autora.

Na figura 65 encontra-se o gráfico de tensão x deformação média longitudinal. Inicialmente observa-se uma rigidez acentuada da cavilha até aproximadamente 80MPa.

Em seguida, há diminuição da rigidez inicial com zonas de plastificação e picos de deformação no intervalo de 80-140Mpa, nesse ponto, ocorre a diminuição da tensão até a deformação de aproximadamente 0,001753mm/mm e, na sequência, eleva-se até a ruptura. O comportamento transversal é similar, conforme exibido no gráfico mais à frente.

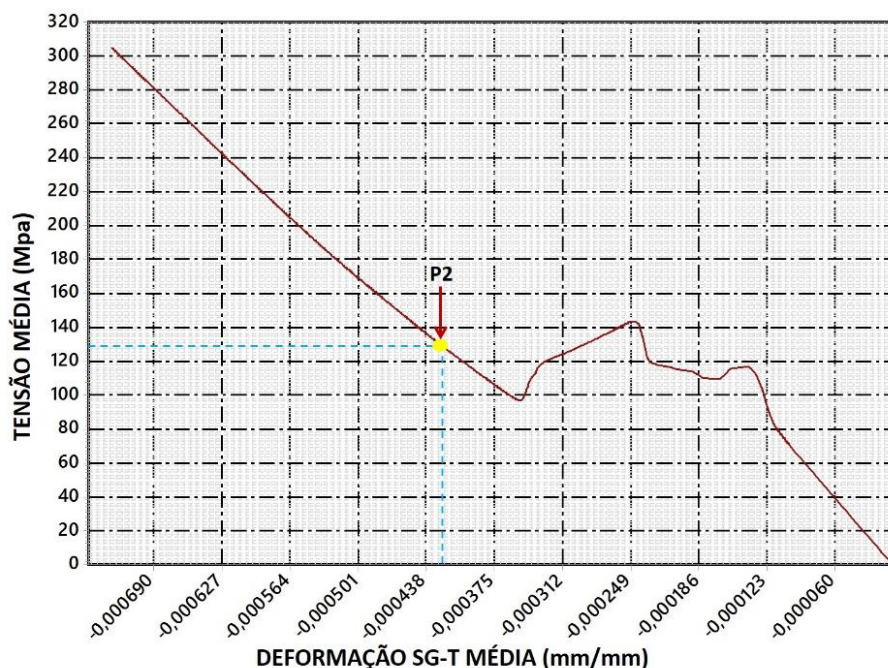
Portanto, para análise de tensão-deformação longitudinal, obteve-se no gráfico a deformação para uma determinada tensão (125 MPA) (figura 65-ponto 1), adotada aleatoriamente em um intervalo com maior linearidade.

Na tensão σ de 125MPa a deformação ϵ_l foi de 0,00204mm/mm. Assim, por meio da equação de resistência dos materiais, pode-se calcular o Módulo de Elasticidade Longitudinal – E_L :

$$E_L = \frac{\sigma}{\epsilon_l} \quad (19)$$

O E_L assim calculado foi de 61274MPa.

Figura 66: Gráfico de tensão-deformação média transversal.



Fonte: a própria autora.

Na sequência, para obter-se o coeficiente de Poisson ν , utilizou-se as informações do gráfico de tensão x deformação transversal (figura 66), com o mesmo procedimento anterior e tensão de 125MPa. Os valores medidos pelo *strain gage* transversal foram negativos, visto que a área da seção transversal da cavilha foi diminuindo de acordo com a tração longitudinal aplicada.

A deformação transversal ε_t para a tensão σ de 125MPa foi equivalente a 0,000413mm/mm (figura 66 - ponto 2). O coeficiente de Poisson ν foi calculado através da equação 32 abaixo:

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (20)$$

O valor assim calculado foi $\nu = 0,20$. O módulo de cisalhamento longitudinal G_l pela equação:

$$G_l = \frac{E_l}{2(1 + \nu)} \quad (21)$$

O módulo de cisalhamento longitudinal resultante foi 25.467MPa. Os resultados obtidos na caracterização das cavilhas de GFRP encontram-se sintetizados na tabela 7 a seguir:

Tabela 7: Comparativo de cálculos teóricos com o ensaio das cavilhas

Variáveis	Resultado do Ensaio das Cavilhas
Tensão Média Longitudinal de Ruptura σ	320 MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal E_{cl}	61274 MPa
Deformação Longitudinal ε_l	0,00204 mm/mm
Coeficiente de Poisson ν	0,20
Deformação Transversal ε_t	0,000413 mm/mm
Módulo de Cisalhamento Longitudinal G_l	25467 MPa

Fonte: a própria autora.

A resistência à tração foi obtida através da média de força máxima de ruptura dos ensaios das cavilhas, conforme tabela 8.

Tabela 8: Resistência à tração média dos ensaios das cavilhas.

Refer.	nº CPs	F_{max} Ruptura (kN)
Teste Preliminar T1	CP1	5,60
	CP2	5,24
	CP3	7,01
	CP4	6,48
	CP5	4,38
	CP6	4,43
	CP7	6,41
	CP8	6,29
	CP9	3,45
	CP10	4,16
Teste Preliminar T2	CP11	7,27
	CP12	6,84
	CP13	7,18
	CP14	7,52
	CP15	5,69
	CP16	7,17
	CP17	7,66
	CP18	7,64
	CP19	7,78
	CP20	6,19
	CP21	6,78
	CP22	7,58
	CP23	7,14
	CP24	7,20
	CP25	8,02
	CP26	7,91
	CP27	8,50
	CP28	7,31
ENSAIO FINAL	CP29	6,77
	CP30	5,55
	CP31	5,51
	CP32	5,88
	CP33	6,52
	CP34	6,09
Média		6,50
Desvio P.		1,20
CV %		18,46

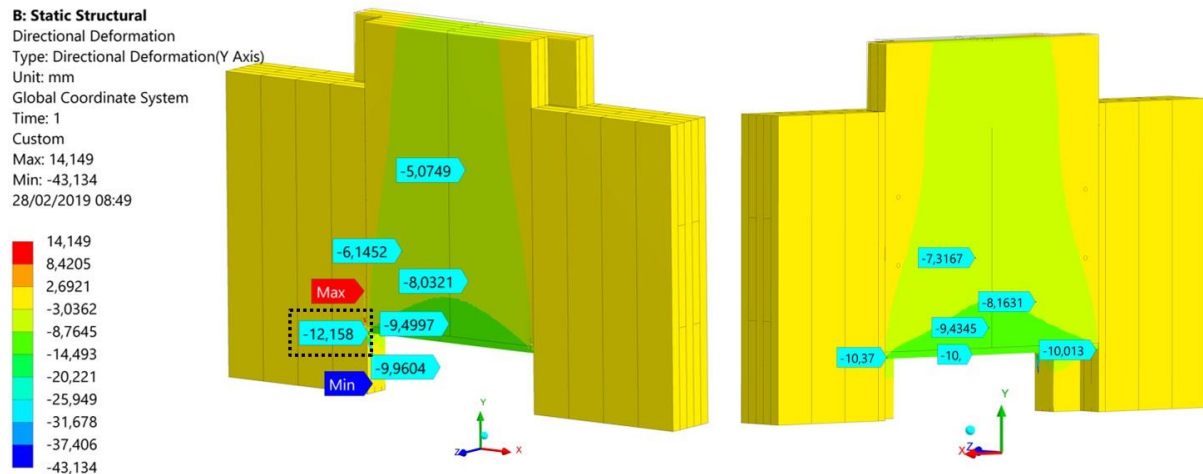
Fonte: a própria autora.

O resultado da média das forças máxima de ruptura apresentou coeficiente de variação de 18,46%, sendo a resistência à tração média da cavilha de GFRP de 6,50kN.

4.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA COMPUTACIONAL

Com os resultados obtidos na caracterização das cavilhas de GFRP, alterou-se as propriedades mecânicas na modelagem paramétrica computacional. O modelo foi então atualizado e o resultado encontra-se exibido na figura 67.

Figura 67: Resultado da Modelagem Parasólida Computacional.



Fonte: a própria autora.

Entre as possibilidades que o software ANSYS oferece de análises, atentou-se ao deslocamento do painel central no eixo y, a fim de comparar os resultados com os obtidos nos ensaios mecânicos.

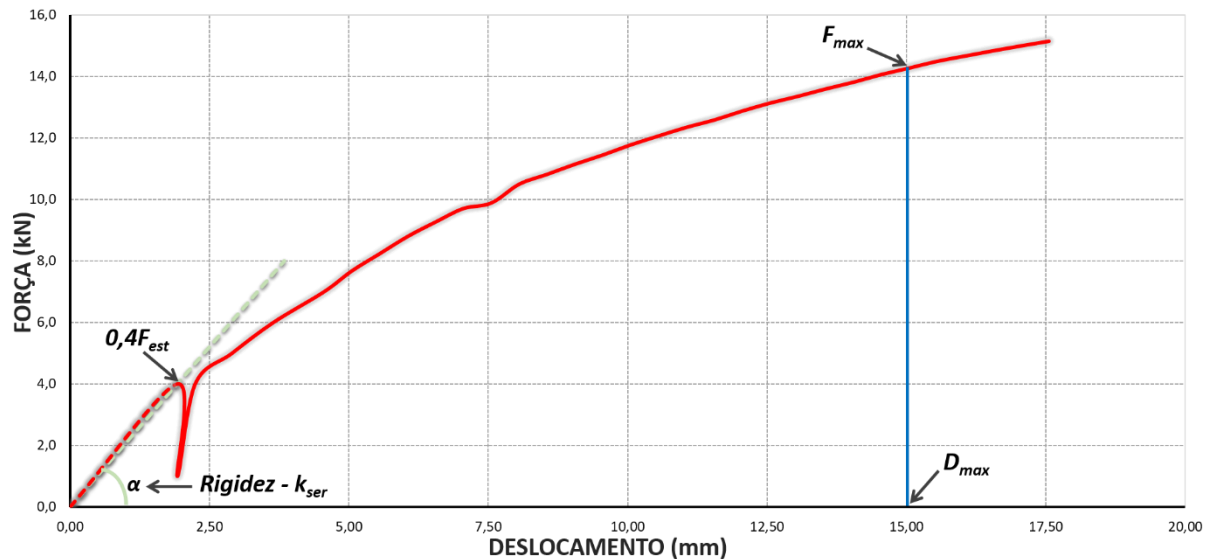
Nota-se na figura 67, que o resultado é apresentado em uma escala de cores, indicando os deslocamentos máximo e mínimo. Além disso, é possível determinar o deslocamento em pontos específicos da estrutura.

O deslocamento máximo do painel central foi de 12,15mm para a força pré-determinada de 15kN nas condições de contorno. O deslocamento máximo global da estrutura foi de 14,14mm na superfície de contato entre o painel central e o lateral, resultante, provavelmente, da tentativa de deslocamento do painel lateral no eixo x, no qual, foi imposto na condição de contorno como elemento fixo.

4.3 ENSAIO DE LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS CLT COM CAVILHAS DE GFRP

A análise do desempenho das ligações cavilhadas de GFRP foi embasada na metodologia apresentada na mesma norma norteadora dos ensaios, a EN 26891 (1991). O ensaio resulta em uma curva de força x deslocamento conforme exibido na figura 68.

Figura 68: Curva de força-deslocamento resultante do ensaio das ligações



Fonte: a própria autora.

Por meio desta curva identifica-se as variáveis de análise (figura 68):

- Força máxima F_{max} – força máxima suportada pela ligação ou o valor atingindo no deslocamento de 15mm – é a capacidade resistente da ligação;
- Deslocamento máximo D_{max} – limitado a 15mm;
- Módulo de Deslizamento Instantâneo k_{ser} – correspondente a rigidez das ligações a partir da reta de regressão linear sobre a curva entre 0,1 e $0,4F_{est}$.

As equações para cálculo destas variáveis (EN 26891, 1991) encontram-se no anexo I.

Segundo Branco (2003), a regressão linear do k_{ser} tem o objetivo de comparar os valores obtidos por cálculo e os obtidos no ensaio.

Os cálculos foram realizados para cada configuração de ligação T1 e T2. Na tabela 9, apresentam-se os resultados obtidos para as ligações de extremidade.

Tabela 9: Resultados obtidos para as ligações de extremidade

Código CPs	Força Estimada F_{est} (kN)	Força Máxima F_{max} (kN)	Deslocamento Máximo D_{max} (mm)	Módulo de deslizamento instantâneo k_{ser} (kN/mm)	
				EN 26891 (1991)	Regressão Linear
CP2	4	5,33	11,54	1,97	2,66
CP3		5,22	14,71	3,87	5,51
CP4		5,77	14,41	3,00	4,32
CP5		6,97	14,75	2,73	3,63
CP6		3,92	11,91	3,20	4,44
Média			5,44	13,46	2,95
Desvio Padrão		1,10	1,60	0,69	1,05
Coeficiente de Variação		20,17	11,87	23,50	25,64

Fonte: a própria autora.

A capacidade resistente (força máxima) das ligações de extremidade exhibe homogeneidade nos resultados, sendo o coeficiente de variação - CV de 20,17%, enquanto o deslocamento máximo D_{max} , apresentou menor variação, com CV de 11,87%.

O valor médio do deslocamento máximo foi de 13,46mm (próximo ao valor máximo estipulado pela norma 15mm). De acordo com Branco (2003), a proximidade do limite de deslocamento significa boa capacidade de dissipação de energia mostrando alto grau de ductilidade – capacidade de deformação de um material até a ruptura – das ligações.

Ao analisar o Módulo de deslizamento instantâneo k_{ser} , percebe-se também homogeneidade nos CVs (calculado e observado), com aproximadamente 25%. Entretanto, a relação entre as médias do k_{ser} calculado e o obtido pela regressão são divergentes. Observa-se que os cálculos subestimam os valores reais apontando para uma reconsideração dos parâmetros adotados nas expressões da norma EN 26891 (1991).

Cabe ressaltar que, o corpo de prova CP7 foi excluído da análise devido aos valores dispersos e de baixa confiabilidade em relação aos demais, indicando algum equívoco no decorrer da elaboração do CP, na acomodação no equipamento de teste ou no desenvolvimento do ensaio.

A tabela 10 apresenta os resultados para as ligações da configuração T2 – juntas *half-lap*.

Tabela 10: Resultados obtidos para as ligações *half-lap*.

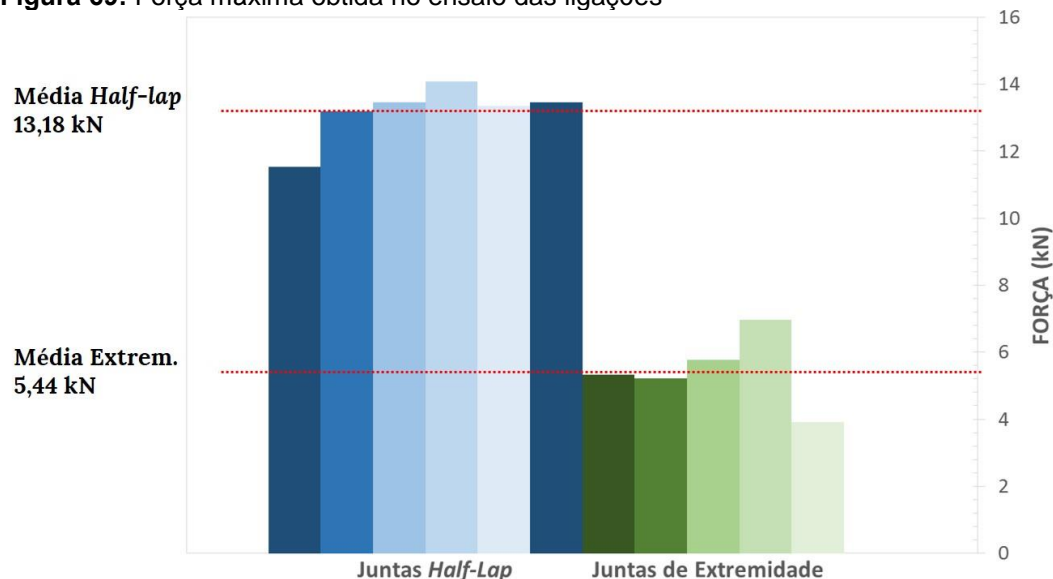
Código CPs	Força Estimada F_{est} (kN)	Força Máxima F_{max} (kN)	Deslocamento Máximo D_{max} (mm)	Módulo de deslizamento instantâneo k_{ser} (kN/mm)	
				EN 26891 (1991)	Regressão Linear ¹
CPB	10	11,54	14,51	1,51	2,03
CPC		13,20	14,94	1,56	2,08
CPD		13,47	14,70	1,27	1,68
CPE		14,07	14,55	1,56	2,11
CPF		13,47	14,95	1,79	2,38
CPG		13,34	14,75	2,61	3,47
Média			13,18	14,73	1,72
Desvio Padrão		0,86	0,19	0,47	0,62
Coeficiente de Variação		6,50	1,27	27,25	27,02

Fonte: a própria autora.

A capacidade resistente dessas ligações se mostra bastante homogênea, com CV de 6,50%. Os resultados mostram que o deslocamento máximo médio ficou ainda mais próximo de 15mm em relação a configuração da junta de extremidade (média 14,73mm).

Os resultados do Módulo de deslizamento instantâneo k_{ser} , (calculado e observado) assim como os do grupo T1, mostraram-se homogêneos e com coeficientes de variação de 27,25 e 27,02% (calculado e regressão respectivamente).

Observa-se que também nessa configuração, os resultados experimentais de rigidez foram superiores aos calculados (em média 25%). Vale aqui a mesma observação de revisão das equações sugeridas pela EN 26891 (1991).

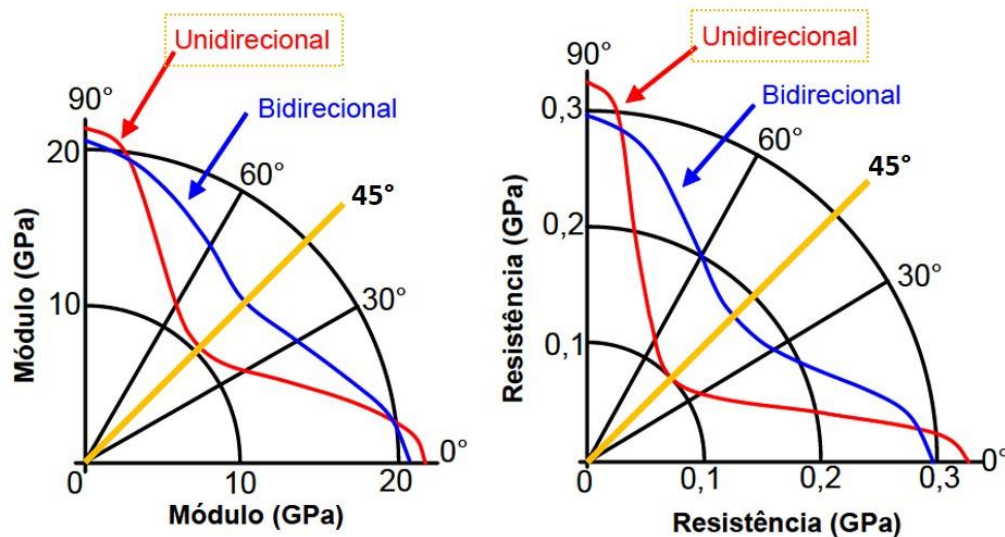
Figura 69: Força máxima obtida no ensaio das ligações

Fonte: a própria autora.

Comparando-se os resultados das ligações de extremidade T1 com os das *half-lap*-T2 nota-se que a força máxima alcançada tem grande dispersão (figura 69), sendo a capacidade de resistência das ligações a 90°-T2 em relação ao plano 41% superior as ligações a 45°-T1, com médias de 13,18kN e 5,44kN, respectivamente.

Contrariamente aos resultados encontrados na literatura, para ligações com pregos e parafusos, as ligações de extremidades com ligações a 45° em relação ao plano apresentaram menor desempenho. Esse fenômeno é explicado pela orientação da fibra da cavilha no plano de aplicação da tensão, conforme exibido na figura 70.

Figura 70: Diagrama do Módulo de elasticidade e Resistência do GFRP.



Fonte: ORTENZI JUNIOR, 2007 apud PIGGOTT, 2002. Adaptado pela autora, 2019.

O diagrama do módulo de elasticidade e resistência demonstra que o GFRP, composto por fibras unidirecionais, orientadas nas direções longitudinal (0°) e transversal (90°) têm o mesmo desempenho. Enquanto que à 45°, apresenta a menor performance (ORTENZI JUNIOR, 2007). Isto também explica o melhor desempenho das ligações em 90° para as ligações *half-lap*-T2.

Quanto ao D_{max} , as ligações T2 também foram responsáveis pelo maior deslocamento. Entretanto, as ligações mais rígidas encontram-se nas ligações de extremidade, média de 41% e 44% - calculado e ensaio, respectivamente - superior a *half-lap* (tabela 11). Os coeficientes de variação de k_{ser} em ambos os casos são aproximados, entre 23,50% – 27,25%.

Tabela 11: Comparativo do Módulo de deslizamento instantâneo das duas configurações.

Módulo de deslizamento instantâneo k_{ser} (kN/mm)				
Corpos de Prova	T1 (extrem.)	T2 (half-lap)	T1 (extrem.)	T2 (half-lap)
	EN 26891	EN 26891	Regressão	Regressão
1	1,97	1,51	2,66	2,03
2	3,87	1,56	5,51	2,08
3	3,00	1,27	4,32	1,68
4	2,73	1,56	3,63	2,11
5	3,20	1,79	4,44	2,38
6	---	2,61	---	3,47
Média	2,95	1,72	4,11	2,29
Desvio P.	0,69	0,47	1,05	0,62
C.V.%	23,50	27,25	25,64	27,02

Fonte: a própria autora.

O modo de ruptura das cavilhas a 45° com ligações de extremidades ocorreu com o cisalhamento das ligações (figura 71), enquanto que, das cavilhas a 90° houve a plastificação e não foi possível averiguar o estado final dos pinos devido a colagem destes nos orifícios.

Figura 71: Cisalhamento das ligações posterior aos ensaios.

Fonte: a própria autora.

O estudo de Gravic, Fragiacomio e Ceccotti (2012) foi a base para a execução das ligações da presente pesquisa, tanto para a modelagem paramétrica computacional, quanto para os ensaios.

Sendo assim, os resultados obtidos nos ensaios das ligações foram comparados com os encontrados na literatura, em:

- Gravic, Fragiaco e Ceccotti (2012) – junta *half-lap*, ligação a 90°, parafuso HBS $\varnothing 8 \times 80$ mm;
- Hossain, Danzing e Tannert (2016) – junta de extremidade, ligação a 45°, parafuso STS $\varnothing 8 \times 180$ mm.

Tabela 12: Comparação dos resultados do ensaio com os da literatura (cavilhas x parafusos).

Referência	Gravic et al. (2012) - Half-lap	Hossain et al. (2016)- Extremidade	Ensaio- Ligações Cavilhas GFRP (médias) (Almeida, 2019)	
			Half-Lap	Extremidades
Força Máxima F_{max} (kN)	5,25	27,2	13,18	5,44
Deslocamento Máximo D_{max} (mm)	15,98	14,5	14,73	13,46
Módulo de deslizamento instantâneo k_{ser} (kN/mm) - Rigidez	1,24	20,4	1,72	2,95
Valor pela quantidade de conectores	4	4	4	4

Fonte: a própria autora.

A capacidade de resistência das ligações cavilhadas de GFRP, com junta *half-lap* foi superior à obtida por Gravic, Fragiaco e Ceccotti (2012) para a mesma quantidade de conectores (tabela 12).

O diâmetro das cavilhas era 6mm e o dos parafusos HBS, 8mm. O comprimento das cavilhas de GFRP igual a espessura dos painéis de CLT, aproximadamente 100mm. Enquanto, Gravic, Fragiaco e Ceccotti (2012) seguiam o comprimento produzido comercialmente do parafuso – 80mm, sendo que a espessura do painel de CLT era 85mm.

Os valores de deslocamento máximo não apresentam grande dispersão na comparação, assim como o módulo de deslizamento instantâneo – correspondente a rigidez das ligações.

A força máxima (capacidade de resistência), no estudo de Hossain, Danzing e Tannert (2016) para ligações de extremidades, foi cinco vezes maior que a obtida nos ensaios (27,2kN x 5,44kN). A rigidez das ligações também se apresentou inferior nos ensaios das cavilhas de GFRP (20,4kN x 2,95kN).

Na pesquisa de Hossain, Danzing e Tannert (2016), conforme exibido na figura 12, utilizaram-se 40 parafusos, sendo assim a comparação do deslocamento máximo não é pertinente.

Os ensaios de ligações realizados por Branco (2003), foram de peças maciças de madeira, os conectores eram pregos com variação de ângulo em relação ao plano. Os resultados encontram-se na tabela 13.

Tabela 13: Comparação dos resultados do ensaio com os de Branco (2003) (cavilhas x pregos).

Referência	Branco, 2003		Ensaio- Ligações Cavilhas GFRP (médias) (Almeida, 2019)	
	Pregos à 90°	Pregos à 135° ¹	Half-Lap	Extremidades
Força Máxima F_{max} (kN)	3,51	2,48	13,18	5,44
Deslocamento Máximo D_{max} (mm)	14,03	13,9	14,73	13,46
Módulo de deslizamento instantâneo k_{ser} (kN/mm) - Rigidez	1,20	1,37	1,72	2,95
Valor pela quantidade de conectores	2	2	4	4

¹ A angulação dos pregos à 135° no estudo são equivalentes a de 45° dos ensaios desta pesquisa.

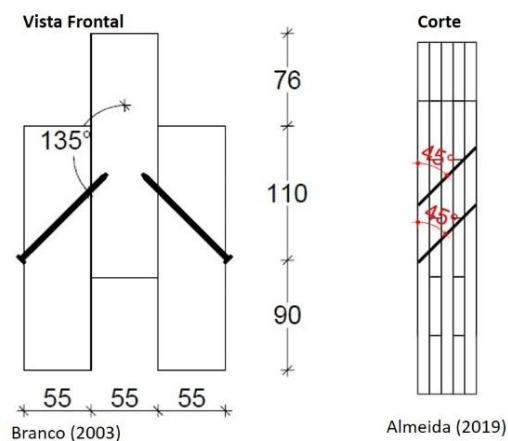
Fonte: a própria autora.

A tabela mostra a capacidade de resistência média obtida por Branco (2003) da ligação com dois pregos. Logo, o valor equivalente para quatro pregos seria 7,02kN. Comparando este valor ao resultado da junta *half-lap* (13,18kN), nota-se que as ligações com cavilhas de GFRP mostraram maior desempenho.

As ligações com pregos a 90° foram mais rígidas do que as das cavilhas (*half-lap*), quando analisado o valor médio do módulo de deslizamento instantâneo para quatro pregos.

A angulação de 135° dos pregos na pesquisa de Branco (2003) equivale ao ângulo de 45° deste estudo (figura 72).

Figura 72: Angulação dos pregos x ângulos das ligações para ligações de extremidade.



Fonte: a própria autora.

A força máxima média das ligações cavilhadas de GFRP apresentou-se superior à das ligações pregadas de Branco (2003) – 5,44kN x 4,96kN. O mesmo ocorreu para o valor de rigidez das ligações, 2,95kN x 2,74kN - cavilhas e pregos, respectivamente.

A comparação dos deslocamentos máximos médios tem relação com a quantidade de conectores e conforme mencionado anteriormente, não foi considerada para análise.

Quanto ao comparativo entre os resultados da modelagem paramétrica computacional e os ensaiados, encontram-se na tabela 14.

Tabela 14: Resultados obtidos na Modelagem Paramétrica x Ensiados – junta *half-lap*.

Referência	Modelagem Computacional		Ensaio- Ligações Cavilhas GFRP (médias) (Almeida, 2019)	
	Half-Lap		Half-Lap	
Força Máxima F_{max} (kN)	15,00		13,18	
Deslocamento Máximo D_{max} (mm)	12,16		14,73	
Módulo de deslizamento instantâneo k_{ser} (kN/mm) - Rigidez	EN 26891 (1991)	Regressão Linear	EN 26891 (1991)	Regressão Linear
	2,59	3,37	1,72	2,29

Fonte: a própria autora.

A capacidade resistente F_{max} , o deslocamento máximo D_{max} e o módulo de deslizamento instantâneo K_{ser} , obtidos na modelagem paramétrica computacional para juntas *half-lap*, mostraram-se superestimados com relação aos resultados do ensaio.

A rigidez das ligações na modelagem foi 33% e 32% (calculada e ensaiada), maior do que a ensaiada. Enquanto que o deslocamento máximo na modelagem foi menor 17% (12,16mm x 14,73mm).

Ainda que, os resultados da modelagem foram superestimados, a ferramenta foi apropriada para uma primeira aproximação do desempenho das cavilhas de GFRP em serviço.

Em suma, a capacidade resistente das cavilhas de GFRP a 90° em relação ao plano com ligação *half-lap* mostrou-se superior aos resultados obtidos em outros estudos e comparados nesta seção.

A rigidez das cavilhas de GFRP também se apresentou mais elevada em relação a dos parafusos utilizados na pesquisa de Gravic, Fragiaco e Ceccotti (2012), assim como, em comparação à ligação pregada do estudo de Branco (2003).

Nas ligações cavilhadas a 45° com junta de extremidade o desempenho foi menor ao dos parafusos, para as variáveis de análise (F_{max} , k_{ser}). Quando comparadas aos pregos, a capacidade resistente e a rigidez foram maiores.

5

CONCLUSÕES

A crescente expansão do CLT está associado ao desenvolvimento tecnológico, a inovação e sustentabilidade. A disseminação desse sistema construtivo desperta o interesse para uma lacuna muito importante, as ligações entre elementos de madeira.

Em paralelo, verificou-se que os materiais compósitos são timidamente aplicados na construção civil, enquanto que em outros setores tem uso significativo. Nesses setores, o emprego altamente disseminado é relacionado as suas altas propriedades mecânicas.

Sendo assim, o propósito desta pesquisa foi de analisar o desempenho estrutural de ligações cavilhadas confeccionadas com Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra de Vidro – GFRP.

Para tal, foi necessário a caracterização mecânica das cavilhas de GFRP, na qual obteve-se os parâmetros principais de comportamento desse elemento: tensão média longitudinal de ruptura σ , módulo de elasticidade Longitudinal E_C , deformação longitudinal ε_l , coeficiente de Poisson ν , deformação transversal ε_t e módulo de Cisalhamento Longitudinal G_l .

Dessa maneira, as cavilhas de GFRP foram confeccionadas para os ensaios de ligações entre os painéis de CLT. Realizou-se duas configurações para a etapa experimental: painéis com ligações de extremidade e conectores a 45°, no plano x, y e 45° no plano z (T1) e painéis com ligações *half-lap* e ligações a 90°, em relação ao plano (T2).

O ensaio seguiu os protocolos da EN26891 (1991). A resultante foi a curva de força x deslocamento. A análise consistiu em averiguar as seguintes variáveis: força máxima (capacidade de resistência), deslocamento máximo (limitado a 15mm) e módulo de deslizamento instantâneo – correspondente a rigidez das ligações.

A rigidez das ligações apresentou-se maior para T1. O resultado da capacidade de resistência média obtido para T2 (13,18kN) foi superior ao da T1 (5,44kN). Esse fenômeno diverge totalmente com as revisões bibliográficas e pode ser explicado pela forma como foi orientada a fibra em relação ao esforço no qual ela é submetida, sendo que em 45° ela exerce a menor performance.

O desempenho das fibras unidirecionais nas direções longitudinal (0°) e transversal (90°) são o mesmo, fato que explica o melhor desempenho para as ligações posicionadas a 90°.

Nas comparações feitas com a revisão de literatura, a capacidade resistente das cavilhas de GFRP à 90° em relação ao plano com junta *half-lap* foram superiores a do prego e parafuso. A rigidez das ligações cavilhadas de GFRP também se apresentou maior em relação a dos parafusos ao passo que, foi menos rígida que os pregos.

As ligações de extremidade com ligações a 45° tiveram desempenho para todos as variáveis de análise menor que o dos parafusos. Relacionada aos pregos, as cavilhas a 45° mostraram-se com capacidade resistente e rigidez maiores.

Os resultados obtidos na modelagem paramétrica computacional foram superestimados comparados aos encontrados no ensaio. No entanto, a análise por meio deste método foi pertinente para a primeira aproximação do desempenho das ligações cavilhadas de GFRP entre painéis de CLT.

A utilização de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro – GFRP para realização de ligações cavilhadas para CLT mostrou ser alternativa técnica viável. O desempenho estrutural desse componente se verifica compatível para este fim, cuja a performance foi comparável e em alguns casos, maior que a de pregos e parafusos.

Por fim, cabe ressaltar o caráter precursor desta pesquisa, visto que até o presente momento, não foi encontrada na literatura estudos iguais ou similares. A originalidade da pesquisa tem ainda grande importância para o setor da construção civil, no qual, ainda tem sido pouco aplicados os materiais compósitos.

6

POSSIBILIDADES DE FUTUROS ESTUDOS

- Viabilidade econômica da aplicação das ligações cavilhadas confeccionadas com Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra de Vidro – GFRP para CLT;
 - Aplicação das ligações cavilhadas de GFRP em outros tipos de estruturas de madeira;
 - Variações dos materiais das fases matriz e dispersa do Compósito;
 - Análise do desempenho estrutural da cavilha GFRP com outros diâmetros e concentração de fibra.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMY, K.; SVECOVA, D. **Strengthening of dapped timber beams using glass fibre reinforced polymer bars**. NRC Research Press Web, pp. 943-955. 2004.
- APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. STANDARD FOR PERFORMANCE – Rated Cross-Laminated Timber, **ANSI/APA PRG 320**. Tacoma, Washington, USA. 2011.
- ASTM. (2002)**. “Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material”. ASTM D 4761-02, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2008)**. “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”. ASTM D 638-08, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2009)**. “Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings.” ASTM E2126-11, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2013)**. “Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings.” ASTM E2126-11, West Conshohocken, PA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190-** Projeto de Estruturas de Madeira. São Paulo. 107 págs. 1997.
- AZEVEDO, Domingos de. **Tipos de carregamentos**. Mogi das Cruzes: Domingos Flávio de Oliveira Azevedo, 2016.
- BALASTRERO JUNIOR, J. O. **Modelagem e otimização de componentes mecânicos em sistemas CAD 3D com emprego de geometrias paramétricas**. Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica. [Dissertação de Mestrado]. 2010. 96f.
- BESSA, V.M.T. **Contribuição da metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios e escritórios**. 286 f. [Tese Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana], Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BOYLE, M.A.; MARTIN, C.I.; NEUNER, J.D. **Epoxy Resins**. In D.B. Miracle & S.L. Donaldson (eds): ASM Handbook Composites Volume 21, pp. 78-89. ASM International, Material Park, Ohio. 2001.
-

BRANCO, J. M. G. **Comportamento das Ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira-betão**. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil. [Dissertação Mestrado] fevereiro, 2003.

BRANCO, J. M. G. Reunião por teleconferência. Londrina, Universidade Estadual de Londrina – UEL. Dezembro. 2017.

BRANCO, J. M. G.; KEKELIAK, M.; LOURENÇO, P. B. **In-plane stiffness of timber floors strengthened with CLT**. Eur. J. Wood Prod. 73: 313-323. 2015.

BRANDNER, R. **Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): a state-of-the-art report**. In: Harris R, Ringhofer A, Schickhofer G (eds) Focus solid timber solutions—European conference on cross laminated timber (CLT). The University of Bath. 2013.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro. 2002.

CEN (European Committee for Standardization). (1991). “Timber structures, joints made with mechanical fasteners, general principles for the determination of strength and deformation characteristics.” **EN-26891**, Brussels, Belgium.

_____ (2001). “Timber structures – Test methods –Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners”. **EN12512**, Brussels, Belgium.

_____ (2003). “Structural timber—strength classes”. **EN338**, Brussels, Belgium.

CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitats) (2016) Criteria for the Defining and Measuring of Tall Buildings. CTBUH, Chicago, IL, USA.

DONATO, G. H. B. **Previsão da vida em fadiga de aços inoxidáveis dúplex SAF 2205 e SAF 2507**. Universidade Federal de Itajubá. Laboratório de Materiais do Centro Universitário da FEI. 2003.

ESPINOZA, O.; TRUJILLO, V. R.; MALLO, M. F. L.; BUEHLMANN, U. **Cross-laminated timber: status and research needs in Europe**. Bioresources.com 11 (1), 281-295. 2016.

European Committee for Standardization, EN 1995-1-1. **Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings**, Brussels, 2004.

European Committee for Standardization (CEN). **Eurocode 8**—design of structures for earthquake resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. 2004.

ETA (European Technical Approval). (2013). “European technical approval: Würth self-tapping screws.” **ETA-11/0190**, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. [Dissertação de mestrado]. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos. 2002. 168f.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. **Analysis of strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fibre and glass fibre**. Materials Research, Volume 6, pp. 193-202. 2003

FOSTER, R. M.; RAMAGE, M. H. **Briefing: Super Tall Timber-Oakwood Tower**. In: Institution of Civil Engineers – ICE, Construction Materials. 2016.

FLATSCHER, G.; BRATULIC, K.; SCHICKHOFER, G. **Experimental tests on cross laminated timber joints and walls**. Structures and Buildings. Volume 168 Issue. November, 2014. Pages 868–877.

FPINNOVATIONS. **CLT Handbook: Cross Laminated Timber**. FPInnovations. Canadá. 2011.

FRAGIACOMO, M.; DUJIC, B.; SUSTERSIC, I. **Elastic and ductile design of multi-storey crosslam massive wooden buildings under seismic actions**. Engineering Structures 33. Pg. 3043-3053. 2011.

GAVRIC, I., FRAGIACOMO, M., AND CECCOTTI, A. **Strength and deformation characteristics of typical X-lam connections**. Proc., 12th World Conf. on Timber Engineering (WCTE), Auckland, New Zealand. 2012.

GENTILE, C., SVECOVA, D., RIZKALLA, S. H. & ASCE, F. **Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications**. Journal of composites for construction, Volume 6, pp. 11-20. 2002.

GUTH, G. A. **Análise dinâmica não linear de um chassi de baja SAR utilizando metodologia de elementos finitos**. Faculdade Horizontina – FAHOR. 2015.

HABA, R.; KITAMORI, A.; MORI, T.; FUKUHARA, T.; KURIHARA, T.; ISODA, H. **Development of CLT panels bond-in method for seismic retrofitting of RC frame structure**. Journal Structure Eng. AIJ, Vol. 81. N° 726, 1299-1308. Aug. 2016.

- HOLLOWAY, L. **Glass Reinforced Plastics in Construction: Engineering Aspects.** Halsted Press, New York – Toronto. 1978.
- HOSSAIN, A.; DANZIG, I.; TANNERT, T. **Cross-Laminated Timber Shear Connections with Double-Angled Self-Tapping Screw Assemblies.** Journal of Structural Engineering. 2016, 142 (11).
- HUNTSMAN.** Advanced Materials – Araldite LY 1564/ Aradur 2954. Huntsman Corporation. Switzerland. GmbH. June, 2011.
- ITANY, R.Y.; FAHERTY, K.F. **Structural wood research, state-of-the-art and research needs.** ASCE, New York, USA. 1984.
- JIN, F.L.; LI, X.; PARK, S.J. **Synthesis and application of epoxy resins: A review.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry 29. Pág. 1-11. 2015
- JOYCE, T., BALLERINI, M., AND SMITH, I. **Mechanical behaviour of in-plane shear connections between CLT wall panels.** Proc., 44th CIB Working Commission W18– Timber Structures, KIT, Karlsruhe, Germany. 2011.
- KLH Massivholz GmbH. **Component Catalogue for Cross Laminated Timber Structures.** 2011.
- LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; LANDRE JUNIOR, J. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos.** Maringá, v. 11, n.2, p 35-43. Mar/abril 2006.
- MARINHO, I. J. P. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis.** Pontifícia Universidade Católica- PUC. [Dissertação de Mestrado] Rio de Janeiro. 2002. 198f.
- MOHAMMAD, M.; GAGNON, M.; BRADFORD K. D.; PODESTO, L. **Introduction to cross laminated timber.** Wood Design Focus, 2012.
- MOURA, J. D. M.; PLETZ, E.; STRASS, M. C. **Qualidade e Processo Produtivo da Madeira para utilização em mobiliário.** 2012. Universidade Estadual de Londrina, 1ª edição.
- PIGGOTT, Michael. **Load Bearing Fibre Composites.** 2nd Edition. Toronto: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002.
- ORTENZI JUNIOR, ALTIBANO. **A Fibra de Vidro em Matrizes Polimérica e Cimentícias e seu uso estrutural em Construção Civil – O Estado-da-Arte.** Universidade Federal de São Carlos – UFS. [Dissertação de Mestrado]. São Carlos, 2007. 205 f.
-

- OWENS CORNING.** Composite Solutions – Reinforcement Guide. Owens Corning Composite Materials, LLC. Toledo, Ohio. March, 2011.
- PEDROSO, C. B. **Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da avaliação acústica na árvore.** [Tese de doutorado] Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo. 2014.
- POPOVSKI, M.; SCHNEIDER, J.; SCHWEINSTEIGER, M. **Lateral load resistance of cross-laminated wood panels.** World Conference on timber engineering – WCTE. 2010.
- PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de madeira.** 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.
- RAMAGE, M. H; FOSTER, R. M.; SMITH, S.; FLANAGAN, K.; BAKKER, R. **Super Tall Timber: design research for the next generation of natural structure.** The Journal of Architecture. 2017.
- REZENDE, M. C.; BOTELHO, E.C. **O uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial.** Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 10, nº2. 2000.
- RICHARDSON, BENJAMIN LEE. **Examination of the lateral resistance of cross-laminated timber panel-to-panel connections.** Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2015.
- SILVA, G. R. da. **Análise da confiabilidade da ligação laje-pilar interno sob punção de acordo com a NBR 6118:2014.** [Dissertação de mestrado] Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. 2017.174 f.
- SORIANO, Humberto Lima. **Métodos de Elementos Finitos em Análise de Estruturas.** Colaboração: Silvio de Souza Lima. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, A. do; MORAES, P. D. de. **Estruturas de Madeira.** Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Civil. Versão 3. Florianópolis, março de 2015.
- UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME.** Avaliação de Políticas Públicas para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa em Edificações. Relatório PNUMA – Iniciativa para Edificações e Construções Sustentáveis. Universidade da Europa Central, Budapeste, 106p. 2007.
-

APÊNDICE I – CONFEÇÕES DE CAVILHAS DE GFRP – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Tabela 15: Pesos e medidas Cavilhas de GFRP – Teste Preliminar 1 e Teste Preliminar 2.

CORPOS DE PROVA - TESTE PRELIMINAR T1							
CÓDIGO	MEDIDAS* (mm)						
	Compr. Total	Compr. Extr. 1	Diâmetro Extr.1	Compr. Centro	Diâmetro Centro	Compr. Extr. 2	Diâmetro Extr.2
CP1	213,05	63,92	6,05	88,11	4,02	63,70	5,98
CP2	218,81	64,91	6,34	85,33	4,16	64,58	5,86
CP3	216,53	65,04	5,56	83,65	4,14	66,79	6,14
CP4	211,23	59,77	6,18	85,49	4,29	65,09	5,99
CP5	210,01	61,25	6,16	85,80	4,27	62,44	6,26
CP6	218,79	59,87	6,00	86,92	4,15	72,69	5,95
CP7	219,93	67,84	6,05	86,71	4,26	66,01	6,46
CP8	210,06	60,67	6,45	85,69	4,23	65,09	6,15
CP9	221,11	72,12	6,26	84,67	4,27	65,44	6,11
CP10	221,51	66,88	6,36	87,60	4,08	69,76	6,34
Média	216,10	64,23	6,14	86,00	4,19	66,16	6,12
Desvio P.	4,60	4,00	0,25	1,35	0,09	3,00	0,19
CV%	2,13	6,23	4,11	1,57	2,18	4,54	3,07

* Medidas com excesso

CORPOS DE PROVA - TESTE PRELIMINAR T2							
CÓDIGO	MEDIDAS* (mm)						
	Compr. Total	Compr. Extr. 1	Diâmetro Extr.1	Compr. Centro	Diâmetro Centro	Compr. Extr. 2	Diâmetro Extr.2
CP1	221,26	70,07	6,06	86,97	4,17	65,11	6,34
CP2	230,18	69,81	6,05	90,05	4,36	69,19	5,92
CP3	220,07	68,18	6,43	87,95	4,16	62,85	5,93
CP4	219,48	69,30	6,06	89,84	4,22	61,42	6,02
CP5	223,74	79,02	6,46	87,95	4,11	56,32	6,01
CP6	228,28	57,36	6,38	117,37	4,05	52,23	6,36
CP7	221,15	62,12	6,01	88,46	4,08	71,51	6,26
CP8	214,47	49,11	6,40	114,50	4,22	51,19	6,37
CP9	213,34	70,81	6,37	86,95	4,21	54,39	6,21
CP10	215,42	59,97	5,98	88,42	4,22	67,90	5,96
CP11	220,04	73,54	5,87	86,90	4,19	58,16	5,98
CP12	216,16	50,54	6,15	114,25	4,15	51,72	6,00
CP13	219,11	53,92	6,50	109,99	4,20	55,96	6,34
CP14	229,38	64,71	6,51	115,05	4,26	48,99	6,34
CP15	223,38	60,72	5,99	112,00	4,22	51,18	6,58
CP16	219,85	54,41	6,04	111,97	4,25	52,28	6,15
CP17	219,47	52,79	6,32	108,93	4,25	56,94	5,96
CP18	213,86	48,99	6,16	114,27	4,07	48,58	5,98
Média	220,48	61,97	6,21		4,19	57,55	6,15
Desvio P.	5,05	9,16	0,21	—	0,08	7,18	0,20
CV%	2,29	14,79	3,38		1,84	12,48	3,28

* Medidas com excesso

Fonte: a própria autora.

Tabela 16: Pesos e medidas Cavilhas de GFRP – Ensaio Final.

CORPOS DE PROVA - ENSAIO FINAL DAS CAVILHAS										
CÓDIGO	PESO (g)			MEDIDAS (mm)						
	Antes da Cura	Curado com excesso	Curado sem excesso	Compr. total	Compr. Extr. 1	Ø Extr.1	Compr. Centro	Ø Centro	Compr. Extr. 2	Ø Extr.2
CP1	7,77	6,66	5,64	181,73	25,82	5,58	115,04	4,28	40,65	5,98
CP2	7,35	6,41	5,51	182,79	29,63	5,91	120,96	3,94	31,32	6,15
CP3	7,66	6,59	5,54	180,14	27,67	6,11	116,41	4,31	35,50	6,27
CP4	7,29	6,35	5,87	191,73	36,46	6,29	116,34	4,17	40,69	6,06
CP5	7,86	6,65	6,24	196,51	41,34	6,39	114,53	4,23	40,63	6,22
CP6	7,94	6,76	6,36	196,03	40,35	6,48	116,02	4,22	40,17	6,36
CP7	7,79	6,69	6,03	195,15	40,07	5,84	114,92	4,16	39,81	5,47
CP8	8,23	6,94	6,08	193,62	39,69	6,23	113,95	4,23	38,89	6,16
CP9	8,21	7,12	6,09	192,24	38,27	6,14	115,41	4,22	38,28	6,02
CP10	7,91	6,86	6,14	190,82	40,24	6,32	110,78	4,25	41,18	6,04
CP11	8,34	6,68	5,32	172,38	20,29	6,26	114,42	4,24	37,32	6,53
Média	7,85	6,70	5,89	188,47	34,53	6,14	115,34	4,20	38,59	6,11
Desvio P.	0,34	0,22	0,34	7,93	7,33	0,27	2,42	0,10	2,96	0,27
CV%	4,29	3,29	5,77	4,21	21,23	4,35	2,10	2,32	7,68	4,40

Fonte: a própria autora.

APÊNDICE II – PROCEDIMENTOS DE CONFEÇÃO DO CLT**Tabela 17:** Módulo de Elasticidade Estático Médio dos painéis CLT confeccionados.**Módulo de Elasticidade Estático - MOE_e Médio**

Nº Painel	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
PAINEL 1	5031	1568	31
PAINEL 2	5869	1864	32
PAINEL 3	5851	1825	31
PAINEL 4	5759	1775	31
PAINEL 5	4744	1377	29
PAINEL 6	4724	1390	29
PAINEL 7	4989	1468	29
PAINEL 8	4985	1498	30
PAINEL 9	4988	1521	30
PAINEL 10	5019	1569	31
PAINEL 11	4960	1439	29
PAINEL 12	6041	1822	30
PAINEL 13	4949	1600	32
PAINEL 14	4824	1450	30
PAINEL 15	4824	1450	30
PAINEL 16	5881	1827	31
PAINEL 17	4657	1466	31
PAINEL 18	5764	1711	30
PAINEL 19	6687	2046	31
PAINEL 20	6599	2137	32
PAINEL 21	6442	2053	32
PAINEL 22	6767	2191	32
PAINEL 23	6664	2033	31
PAINEL 24	5383	1736	32
PAINEL 25	5440	1635	30
PAINEL 26	5416	1647	30
PAINEL 27	5411	1632	30
PAINEL 28	5422	1564	29
PAINEL 29	5267	1691	32
PAINEL 30	5273	1666	32
PAINEL 31	6739	1995	30
PAINEL 32	7099	2247	32
PAINEL 33	8703	2777	32
PAINEL 34	5396	1569	29
PAINEL 35	5405	1582	29
PAINEL 36	5407	1601	30
PAINEL 37	6442	2044	32
PAINEL 38	6477	2085	32
PAINEL 39	6500	2094	32
PAINEL 40	6647	2110	32
PAINEL 41	6675	2112	32
PAINEL 42	6708	2158	32

Fonte: a própria autora.

Registros fotográficos do processo de confecção dos painéis CLT

Figura 73: Peças de madeira classificadas, cortadas e agrupadas.



Fonte: a própria autora.

Figura 74: Aplicação de adesivo para colagem das camadas dos painéis CLT.



Fonte: a própria autora.

Figura 75: Painéis colados e preparados para esquadramento.



Fonte: a própria autora.

Figura 76: Esquadreamento dos painéis.



Fonte: a própria autora.

Figura 77: Painéis de CLT concluídos.



Fonte: a própria autora.

APÊNDICE III – CONFEÇÃO DAS CAVILHAS PARA ENSAIO DAS LIGAÇÕES – CLT

Tabela 18: Peso das cavilhas de GFRP para ensaio das ligações entre painéis de CLT.

PESO DAS CAVILHAS DE GFRP - ENSAIO DAS LIGAÇÕES - CLT					
Código	Peso (g)	Código	Peso (g)	Código	Peso (g)
CP1	11,09	CP25	10,96	CP49	10,81
CP2	10,98	CP26	11,06	CP50	11,05
CP3	11,05	CP27	11,06	CP51	11,18
CP4	10,98	CP28	11,02	CP52	11,20
CP5	11,06	CP29	11,05	CP53	11,14
CP6	11,07	CP30	11,09	CP54	11,14
CP7	11,10	CP31	11,08	CP55	11,16
CP8	10,85	CP32	11,10	CP56	11,08
CP9	11,07	CP33	11,07	CP57	11,18
CP10	10,45	CP34	11,05	CP58	11,17
CP11	11,07	CP35	11,00	CP59	11,03
CP12	10,86	CP36	10,99	CP60	11,16
CP13	11,10	CP37	10,91	CP61	11,14
CP14	10,92	CP38	11,09	CP62	11,12
CP15	11,02	CP39	11,08	CP63	10,98
CP16	10,96	CP40	11,09	CP64	11,14
CP17	11,05	CP41	11,00	CP65	11,10
CP18	11,05	CP42	11,10	CP66	11,18
CP19	11,07	CP43	11,04	CP67	11,13
CP20	11,04	CP44	11,01	CP68	10,97
CP21	11,05	CP45	10,89	CP69	10,97
CP22	11,00	CP46	11,10	CP70	10,71
CP23	11,04	CP47	11,11	CP71	11,16
CP24	11,06	CP48	11,09	CP72	10,97
Média					11,04
Desvio P.					0,11
Coef. V. %					1,04

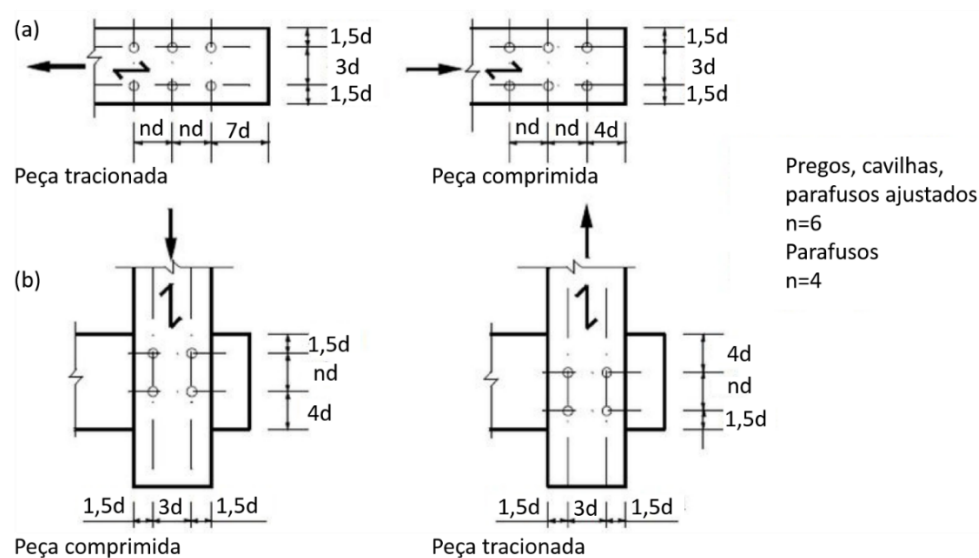
Fonte: a própria autora.

ANEXO I – DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

A – ESPAÇAMENTOS MÍNIMOS ENTRE LIGAÇÕES

Os espaçamentos mínimos entre ligações com pinos (pregos com pré-furação, parafusos e cavilhas) recomendado pela NBR 7190 (1997)*:

Figura 78: Espaçamentos mínimos entre ligações com pinos

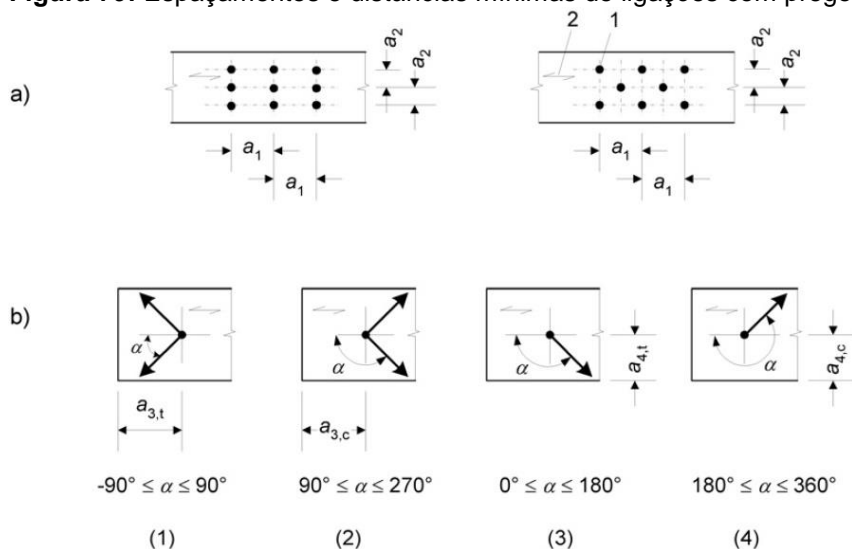


*Na situação (a), as peças são tracionadas e comprimidas no sentido paralelo as fibras da madeira, enquanto na (b), o esforço é normal às fibras, peça na horizontal.

Fonte: Adaptado de NBR 7190, 1997.

Espaçamento de acordo com o Eurocode 5**:

Figura 79: Espaçamentos e distâncias mínimas de ligações com pregos, parafusos e cavilhas.



Fonte: Adaptado de EN 1995-1-1, 2004.

**Leva em consideração a distância entre as ligações e ainda, o ângulo em que a força é aplicada em relação à fibra da madeira. O número 1 representa as ligações e o 2, a direção da fibra, e:

- a_1 é a distância paralela à fibra entre dois conectores;
- a_2 é a distância perpendicular à fibra entre dois conectores;
- $a_{3,t}$ é a distância da extremidade solicitada e o espaçamento $a_{3,c}$ da extremidade não solicitada;
- $a_{4,t}$ é a distância da face solicitada e o espaçamento $a_{4,c}$ da face não solicitada.

Para o caso (b), são definidas as distâncias das extremidades e faces solicitadas ou não, conforme apresentados na tabela abaixo:

Tabela 19: Espaçamentos e distâncias mínimas, dependente do ângulo da ligação.

	ÂNGULOS:	CAVILHAS	PARAFUSOS	ÂNGULOS:	PREGOS		
					com pré-furação	sem pré-furação	
					$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$	
a_1	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cos \alpha) d$	$(4 + \cos \alpha) d$	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + \cos \alpha) d$	$d < 5\text{mm}$: $(5 + 5 \cos \alpha) d$ $d \geq 5\text{mm}$: $(5 + 7 \cos \alpha) d$	$(7 + 8 \cos \alpha) d$
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$	$4d$	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + \sin \alpha) d$	$5d$	$7d$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d; 80\text{mm})$	$\max(7d; 80\text{mm})$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(7+5\cos \alpha) d$	$(10+5 \cos \alpha) d$	$(15+5 \cos \alpha) d$
$a_{3,c}$	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	$\max(a_{3,t} \sin \alpha)d; 3d$	$\max[(1+6 \sin \alpha) d; 4d]$	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$7d$	$10d$	$15d$
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	$3d$	$4d$				
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max(a_{3,t} \sin \alpha)d; 3d$	$\max[(1+6 \sin \alpha) d; 4d]$				
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max[(2+2 \sin \alpha) d; 3d]$	$\max[(2+2 \sin \alpha) d; 3d]$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$d < 5\text{mm}$: $(3+2 \sin \alpha) d$	$d < 5\text{mm}$: $(5+2 \sin \alpha) d$	$d < 5\text{mm}$: $(7+2 \sin \alpha) d$
					$d \geq 5\text{mm}$: $(3+4 \sin \alpha) d$	$d \geq 5\text{mm}$: $(5+5 \sin \alpha) d$	$d \geq 5\text{mm}$: $(7+5 \sin \alpha) d$
$a_{4,c}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$	$3d$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$	$5d$	$7d$

Fonte: Adaptado de EN 1995-1-1, 2004.

→ Equação para averiguação da necessidade de pré-furação, segundo o Eurocode 5, que deve ocorrer quando os elementos de madeira tiverem espessura menor que:

$$t = \max \left\{ \begin{array}{l} 7d \\ \text{ou} \\ (13d - 30) \frac{\rho_k}{400} \end{array} \right. \quad (\text{A-1})$$

t é a espessura mínima do elemento de madeira, em milímetros;

ρ_k é o valor característico da densidade da madeira;

d é o diâmetro do prego, em milímetros.

B – RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO LOCALIZADO DA MADEIRA

→ Ligações com pregos

Sem pré-furação:

$$f_{h,k} = 0,082 \rho_k \cdot d^{-0,3} \text{ N/mm}^2 \quad (\text{B-1})$$

Com pré-furação:

$$f_{h,k} = 0,082 (1 - 0,01 \cdot d) \rho_k \text{ N/mm}^2 \quad (\text{B-2})$$

ρ_k é o valor característico da densidade da madeira

d é o diâmetro do prego, em milímetros

$f_{h,k}$ é o valor característico de esmagamento localizado

→ Ligações com cavilhas, considerado o ângulo da ligação em relação ao grão da madeira:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (\text{B-3})$$

$f_{h,0,k}$ é o valor característico de esmagamento localizado paralelo ao grão, em N/mm², obtido na equação 3.

ρ_k é o valor característico da densidade da madeira;

α é o ângulo da carga em relação ao grão;

d é o diâmetro do prego, em milímetros.

E os valores para k_{90} são:

Para madeiras coníferas: $1,35 + 0,015 d$

Para LVL: $1,30 + 0,015 d$

Para folhosas: $0,90 + 0,015 d$

C – CAPACIDADE DE RESISTÊNCIA E PLASTIFICAÇÃO DA LIGAÇÃO**C-1 – RESISTÊNCIA E PLASTIFICAÇÃO – EUROCODE 5**

Corte simples:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(a)} \\ f_{h,2,k} t_2 d & \text{(b)} \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(c)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(d)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(e)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(f)} \end{cases} \quad \text{(C-1)}$$

Corte Duplo:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(g)} \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & \text{(h)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(j)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(k)} \end{cases} \quad \text{(C-2)}$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$$

$F_{v,Rk}$ = capacidade característica resistente por plano de corte, por ligação;

t_i = espessura da madeira ou profundidade de penetração;

$f_{h,i,k}$ = resistência característica ao esmagamento localizado no elemento i ;

d = diâmetro da ligação

$M_{y,Rk}$ = momento característico de plastificação da ligação;

β = relação entre a resistência ao esmagamento dos diferentes elementos conectados;

$F_{ax,Rk}$ = capacidade característica de resistência axial ao arranque da ligação.

Sendo, o momento de plastificação da ligação do tipo cavilha, determinado por:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad \text{(C-3)}$$

Onde:

$M_{y,Rk}$ é o valor característico do momento de plastificação;

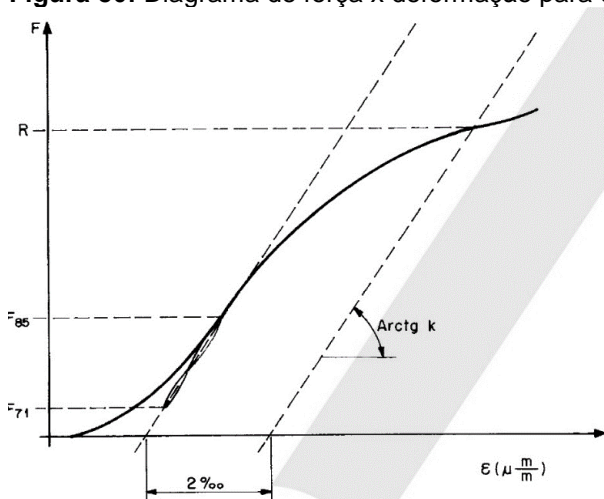
d é o diâmetro da ligação, em milímetros;

$f_{u,k}$ é a resistência característica à tração da cavilha, em N/mm²

C-2 – RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO – NBR 7190

Diagrama de Força x Deformação para determinação da resistência da ligação:

Figura 80: Diagrama de força x deformação para determinação da resistência da ligação.



Fonte: NBR 7190, 1997.

A deformação específica residual da ligação é medida a partir da intersecção com o eixo das deformações da reta secante, definidos pelos valores F_{71} , ϵ_{71} e F_{85} , ϵ_{85} dos pontos 71 e 85. Desta intersecção é traçada uma reta paralela com afastamento de 2‰, até o seu encontro com o diagrama de força x deformação acima. A força correspondente obtida no diagrama é a resistência da ligação (R).

A deformação específica residual é encontrada através de:

$$\epsilon = \frac{\Delta u}{L_0} \quad (C-4)$$

ϵ é a deformação específica residual;

Δu é o deslocamento relativo;

L_0 é comprimento da base de medida padronizada;

O L_0 é calculado levando em conta a direção das fibras da madeira:

$$\text{Paralela às fibras:} \quad L_0 = 2 (7d) + n (a) \quad (\text{C-5})$$

$$\text{Normal às fibras:} \quad L_0 = (7d) + (4d) + n (a) \quad (\text{C-6})$$

Onde:

d é o diâmetro do pino, em milímetros;

n é o número de espaçamentos entre os pinos segundo a direção paralela ao esforço;

a é o espaçamento entre pinos, medido de eixo a eixo na direção paralela ao esforço, em milímetros.

D – RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES

Equação para cálculo da rigidez das ligações, disponibilizada na EN 26891 (1991), resultante do programa de ensaio:

$$K_{ser} = 0,4F_{est} / v_{i,mod} \quad (\text{D-1})$$

F_{est} = força estimada (N);

e $v_{i,mod}$ é determinado pela equação (12):

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3} (v_{0,4} - v_{0,1}) \quad (\text{D-2})$$

$v_{0,4}$ = deslocamento (mm) em $0,4F_{est}$

$v_{0,1}$ = deslocamento (mm) em $0,1F_{est}$

→ Avaliação segundo o Eurocode 5, para pregos, parafusos e cavilhas

Com pré-furação:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \quad (\text{D-3})$$

Sem pré-furação:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d^{0,8}}{30} \quad (\text{D-4})$$

ρ_m = peso específico da madeira em kg/m^3

d = diâmetro da ligação em milímetros.

ANEXO II – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS: RESINA, ENDURECEDOR E FIBRA DE VIDRO

Tabela 20: Propriedades dos materiais: Resina, Endurecedor e Fibra de Vidro

RESINA: ARALDITE LY COM ENDURECEDOR ARADUR 2963 - HUNTSMAN		FIBRA DE VIDRO E-CR GLASS Advantex® - OWENS CORNING	
PROPRIEDADES	VALOR	PROPRIEDADES	VALOR
<i>Resistência à Tração</i>	5,73 Kg/mm ²	Density	2,62 g/cm ³
<i>Resistência à Flexão</i>	9,73 Kg/mm ²	Young's Modulus	81 GPa
<i>Resistência à Compressão</i>	7,92 Kg/mm ²	Tensile Strength	2200 Mpa
<i>Densidade:</i>		Tensile Modulus	81 GPa
Araldite	1,10 -1,20 g/cm ³	Poisson's Ratio	0,33
Aradur	1,00 g/cm ³	Fiber Volume Fraction	60-63%
PROPORÇÃO DE MISTURA (gramas)			
Araldite	100		
Aradur	48		
TEMPO DE USO DA MISTURA (à 25°C)			
aproximadamente 35 minutos			
TEMPO DE CURA			
Temperatura à 25°C : 24 horas			
FIBRA DE VIDRO E-CR GLASS Advantex® - OWENS CORNING			
PROPRIEDADES	VALOR		
Density	2,62 g/cm ³		
Young's Modulus	81 GPa		
Tensile Strength	2200 Mpa		
Tensile Modulus	81 GPa		
Poisson's Ratio	0,33		
Fiber Volume Fraction	60-63%		

Fonte: HUNTSMAN, 2011; OWENS CORNING, 2011.