



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

LAISA REBECA DO VALE BARCAROLO

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA DE LIGAÇÕES POR CAVILHA DE  
COMPÓSITO ESTRUTURAL EM VIGAS DE MADEIRA  
LAMINADA**

---

Londrina  
2019

LAISA REBECA DO VALE BARCAROLO

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA DE LIGAÇÕES POR CAVILHA DE  
COMPÓSITO ESTRUTURAL EM VIGAS DE MADEIRA  
LAMINADA**

Dissertação apresentada como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo, no Programa Associado de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina e Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo  
Moura

Londrina  
2019

LAISA REBECA DO VALE BARCAROLO

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA DE LIGAÇÕES POR CAVILHA DE  
COMPÓSITO ESTRUTURAL EM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA**

Dissertação apresentada como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo, no Programa Associado de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina e Universidade Estadual de Maringá.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Prof. Dr. Francisco Antônio Rocco Lähr  
Universidade de São Paulo - USP

---

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

Londrina, 11 de Junho de 2019.

Dedico este trabalho a Deus.  
Ao meu esposo Marcos.  
Aos meus pais, João Batista e Maria Vilani  
e minhas irmãs Ana , Salete e Milena.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me proteger e guiar sempre.

Ao meu esposo Marcos Vinício de Camargo, meu companheiro nesta jornada, por ser essencial em minha vida, fazendo-me acreditar que posso ir mais longe do que imagino. Devido ao seu incentivo constante este trabalho pôde ser concretizado. Obrigada por ter feito do meu sonho o nosso sonho!

Aos meus amados pais Maria Vilani e João Batista e irmãs Ana Letícia, Salete e Milena pelo amor e força constante e por me guiarem com sabedoria em todas as etapas de minha vida

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, contribuindo diretamente para meu crescimento científico.

Ao Prof. Dr. Altibano Ortenzi Jr. que contribuiu com seus conhecimentos estando sempre disponível.

Aos professores da banca examinadora, Prof. Dr. Francisco Antônio Rocco Lähr e Prof. Dr. Ricardo Dias Silva pelas contribuições e considerações na fase de qualificação deste trabalho.

A Owens Corning pela doação da fibra de vidro.

À empresa Metalsoma, pela doação das peças metálicas para reforço do aparato utilizado no ensaio.

Ao Programa de Pós- Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPU - por proporcionar meus estudos de mestrado, aos professores pelas aulas ministradas e aos amigos Amanda Ceinoti de Almeida e José Carlos Rehme pelo companheirismo e incentivo constante durante este percurso.

Às estagiárias que colaboraram com a pesquisa na fase de ensaios, em especial a Gabriela Alves Andolpho.

Aos técnicos dos laboratórios de maquetes, estruturas e materiais da Universidade Estadual de Londrina, que não pouparam esforços nas etapas práticas do trabalho, em especial Carlos Alberto Duarte e Luís Gustavo Patrocino.

À UniFil (Centro Universitário Filadélfia) por disponibilizar o laboratório do curso de Engenharia Civil para a etapa prática desta pesquisa e ao técnico Augusto César Pereira Góis pela solicitude.

*“A sabedoria não nos é dada.  
É preciso descobri-la por nós mesmos, depois  
de uma viagem que ninguém nos pode poupar  
ou fazer por nós”*

Marcel Proust – Escritor Francês

BARCAROLO, Laisa Rebeca Do Vale. **Estudo de eficiência de ligações por cavilha de compósito estrutural em vigas de madeira laminada.** 2019. 129 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2019.

## RESUMO

A indústria da construção civil no contexto mundial tem buscado sistemas construtivos mais eficientes no que diz respeito à preservação ambiental. A madeira habitualmente utilizada provém de florestas nativas, que estão cada vez mais escassas. Com o fortalecimento dos conceitos de sustentabilidade, criou-se a necessidade do desenvolvimento de alternativas viáveis para a utilização racional de espécies provenientes de florestas plantadas. Neste trabalho foi utilizada madeira do gênero *Pinus spp* a fim de agregar valor a esta matéria prima com grande disponibilidade no mercado. A madeira *Pinus spp* comercializada possui variabilidade em suas propriedades em função de sua idade e comprimento limitado de três metros (devido à dimensão da tora e por questões de transporte) e através de ligações nas peças de madeira conseguem-se peças com comprimento estrutural superior. A proposta deste trabalho é utilizar ligações cavilhadas de compósito estrutural em vigas de madeira laminada. Os materiais compósitos são constituídos pela fase matriz e a fase reforço e, na construção civil, geralmente, são aplicados como reforços de estruturas. Esta pesquisa almeja comparar o desempenho estrutural de ligações com cavilhas de compósito estrutural (epóxi, endurecedor e fibra de vidro). Para alcançar tal objetivo, realizou-se ensaio à tração de emendas com dois tipos de ligações cavilhadas: pré-fabricada e curada *in situ* e posteriormente compararam-se os resultados com a literatura. As cavilhas curadas *in situ* apresentaram resultados superiores ao observados nas cavilhas pré-fabricadas, em 49% na resistência da ligação e em 46% na rigidez. Nas comparações dos resultados com a revisão de literatura, concluiu-se que as ligações cavilhadas curadas *in situ* e pré-fabricadas tiveram desempenho quanto à resistência por ligação por seção de corte superiores aos observados para pregos lisos, pregos ardox e cavilhas em compósito estrutural pré-fabricado, de diâmetros de 3,8 mm, 3,4 mm e 6 mm, respectivamente. Como as normas consultadas não fazem menção ao dimensionamento de ligações axiais por corte para compósito estrutural em peças de madeira, foi realizado ensaio à tração da cavilha para caracterizar o material e calcular o diâmetro a ser adotado no ensaio à tração de emendas. O caráter precursor desta pesquisa é de grande importância para o estudo de aplicação de material compósito e como contribuição original utiliza este material em ligações cavilhadas curadas *in situ*.

**Palavras-chave:** *Pinus spp*. Viga laminada. Compósito estrutural. Ligações cavilhadas. Ligações pregadas.

BARCAROLO, Laisa Rebeca Do Vale. **Study of the efficiency of structural composite bolt connections in laminated wood beams.** 2019. 129 pp. Dissertation (Master in Architecture and Urbanism) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2019.

## ABSTRACT

The construction industry has sought construction systems more environmental friendly. The wood usually used has come from native forests, which are increasingly scarce. With the strengthening of sustainability concepts, the need to develop viable alternatives for the rational use of species from planted forests has been carried on. In this work wood of the genus *Pinus spp* was used because of its great availability in the market. The *Pinus* timber commercially available have limited length to three meters (due to the dimensions of the log and transportation issues) and connections allow increase lengths to structural elements. The purpose of this work is the analysis of structural composite dowel connections in laminated wood beams. The composite materials in the civil construction are generally applied as reinforcement of structures. This research aims to compare the structural performance of two types of dowel connections composed of structural composite (epoxy, hardener and fiberglass): prefabricated and “in situ” cured. Tensile tests showed that the “in situ” cured dowel connections presented superior results than those observed to the prefabricated ones, 49% in strength and 46% in stiffness. Comparisons of these results to the literature, showed that dowel connections both types of this study, “in situ” cured and prefabricated, presented better performance than those observed to nailed connections (smooth and ardox) and composite dowelled connections applied to CLT panels. As the standards consulted do not mention the design of composite-made dowel connections, the characterization of the material was necessary to the determination of the diameter to be adopted in the tensile connections. The precursor character of this research is an original contribution to the utilization of composite materials in dowel connections.

**Key-words:** *Pinus spp*. Timber. Glulam beams. Structural composite. Dowel connections. Nailed connections.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> -	Parâmetros para densidade da madeira <i>Pinus</i> spp. ....	26
<b>Figura 2</b> -	Tipo de laminação: horizontal (a) e vertical (b) .....	29
<b>Figura 3</b> -	Detalhes de emendas de lâminas (a) distribuição das emendas na direção longitudinal; (b) junta por corte em chanfro; (c) emenda dentada vertical; (d) emenda dentada horizontal .....	32
<b>Figura 4</b> -	Parâmetros geométricos das emendas dentadas .....	33
<b>Figura 5</b> -	Tipos de ligações estruturais de peças de madeira .....	35
<b>Figura 6</b> -	Estrutura química básica do grupo epóxi .....	38
<b>Figura 7</b> -	União de elementos de madeira através de varões FRP: (a) União entre dois topos; (b) União entre elementos em forma de L .....	40
<b>Figura 8</b> -	Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas; (b) descontínuas e alinhadas; (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente .....	40
<b>Figura 9</b> -	Estiramento da fibra .....	43
<b>Figura 10</b> -	Moldagem aberta a) <i>hand lay-up</i> e b) <i>spray-up</i> .....	44
<b>Figura 11</b> -	Moldagem por compressão a) BMC e b) SMC.....	45
<b>Figura 12</b> -	Esquema da Moldagem RTM.....	46
<b>Figura 13</b> -	Esquema processo VARTM.....	46
<b>Figura 14</b> -	Processo <i>filament winding</i> .....	47
<b>Figura 15</b> -	Laminação contínua .....	47
<b>Figura 16</b> -	Processo <i>prepeg</i> .....	48
<b>Figura 17</b> -	Esquema do Processo de Pultrusão .....	48
<b>Figura 18</b> -	Materiais utilizados na mistura do compósito estrutural: Aradur 2963, Araldite Ly 1564BR e fibra de vidro Advantex E-CR GLASS .....	52
<b>Figura 19</b> -	Pesagem da Fibra de vidro Advantex E-CR GLASS.....	53
<b>Figura 20</b> -	Canudo Straw plast.....	54
<b>Figura 21</b> -	Acima corpo de prova por injeção e sucção e abaixo por infusão .....	54

<b>Figura 22</b> -	Preparação da mistura: Inserção da resina epóxi Araldite Ly 1564BR, do endurecedor Aradur 2963 e mistura sendo realizada com palito de madeira .....	55
<b>Figura 23</b> -	Banho das fibras na resina e fio metálico utilizado para passá-las no canudo.....	56
<b>Figura 24</b> -	Pesagem dos corpos de prova.....	56
<b>Figura 25</b> -	Corpo de prova em processo de cura .....	57
<b>Figura 26</b> -	Trinta e três corpos de prova produzidos .....	58
<b>Figura 27</b> -	Corpos de prova desmoldados: à esquerda os selecionados para o ensaio à tração e à direita demais corpos de prova.....	58
<b>Figura 28</b> -	Corpo de prova com extremidades engrossadas.....	59
<b>Figura 29</b> -	Ensaio corpo de prova .....	60
<b>Figura 30</b> -	Corpos de prova com diferentes diâmetros centrais .....	61
<b>Figura 31</b> -	Fabricação dos corpos de Prova e Corpos de prova desenformados .....	62
<b>Figura 32</b> -	Dimensões do corpo de prova ASTM D 638-08 (2008) tipo I.....	63
<b>Figura 33</b> -	Projeto do corpo de prova de tração com base na norma ASTM D 638-08 (2008) tipo I .....	64
<b>Figura 34</b> -	Corpos de prova tipo A .....	65
<b>Figura 35</b> -	Corpos de prova tipo B .....	65
<b>Figura 36</b> -	Pesagem da Fibra de vidro Advantex E-CR GLASS e preparação da mistura .....	67
<b>Figura 37</b> -	Banho das fibras na resina e fio metálico utilizado para moldagem da cavilha .....	68
<b>Figura 38</b> -	Corpos de prova lixados e marcados.....	69
<b>Figura 39</b> -	À esquerda, materiais utilizados: <i>strain gages</i> Kyowa e super bonder e à direita; <i>strain gages</i> submetidos ao multímetro.....	70
<b>Figura 40</b> -	Colagem dos <i>strain gages</i> : Super bonder aplicado no extensômetro, colagem deste no corpo de prova e plástico auxiliando colagem (da esquerda para a direita) .....	70
<b>Figura 41</b> -	Corpo de prova após colagem dos <i>strain gages</i> .....	71
<b>Figura 42</b> -	União da fiação do <i>strain gage</i> com fio flexível e isolamento com fita isolante 3M.....	71
<b>Figura 43</b> -	Fios flexíveis testados com multímetro .....	72

<b>Figura 44</b> -	Soldando a fiação .....	72
<b>Figura 45</b> -	Corpo de prova preparado para ensaio à tração.....	73
<b>Figura 46</b> -	Da esquerda para a direita: Corpo de prova na EMIC DL 30000 com fios ligados ao sistema de aquisição de dados Lynx AqDados 7.2, corpo de prova antes da ruptura e corpo de prova após ruptura. ....	74
<b>Figura 47</b> -	Corpos de prova após ensaio .....	74
<b>Figura 48</b> -	Medição da umidade da madeira .....	75
<b>Figura 49</b> -	Tábuas 30 cm de largura, perfilamento das tábuas e tábuas 14 cm largura .....	76
<b>Figura 50</b> -	Classificação mecânica estática (carregamento) .....	77
<b>Figura 51</b> -	Ultrassom USLab da marca Agricef .....	78
<b>Figura 52</b> -	Classificação mecânica dinâmica (ultrassom).....	78
<b>Figura 53</b> -	Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático da madeira de <i>Pinus spp.</i> ....	79
<b>Figura 54</b> -	Detalhe do modelo .....	82
<b>Figura 55</b> -	Tábuas nomeadas e enumeradas.....	82
<b>Figura 56</b> -	Regiões com nós e defeitos e peças sendo cortadas .....	83
<b>Figura 57</b> -	Nós e defeitos descartados.....	84
<b>Figura 58</b> -	Corpos de prova agrupados.....	84
<b>Figura 59</b> -	Arranjo da ligação da emenda .....	85
<b>Figura 60</b> -	Molde imerso em água quente, moldes aderidos a peça de madeira e aplicação de desmoldante.....	85
<b>Figura 61</b> -	Banho de resina e fibras posicionadas no molde.....	86
<b>Figura 62</b> -	Cavilhas pré-fabricadas e cavilhas com 6 cm de comprimento sendo retificadas .....	86
<b>Figura 63</b> -	Furação com auxílio de gabarito e cavilhas inseridas no corpo de prova .....	87
<b>Figura 64</b> -	Fibra sendo impregnada com resina e fibra impregnada sendo passada nas peças de madeira com auxílio de fio metálico .....	87
<b>Figura 65</b> -	Excessos sendo cortados .....	88
<b>Figura 66</b> -	Esquema reforma aparato .....	88
<b>Figura 67</b> -	Imagem do pórtico metálico com corpo de prova montado no aparato utilizando-se medidores LVDT .....	89

<b>Figura 68</b> -	Aparato deformado .....	90
<b>Figura 69</b> -	Curva modelo tensão vs. deformação de um corpo de prova .....	91
<b>Figura 70</b> -	Curva tensão vs. deformação longitudinal média.....	92
<b>Figura 71</b> -	Curva tensão vs. deformação transversal média .....	92
<b>Figura 72</b> -	Mecanismo de transferência de esforços na emenda.....	95
<b>Figura 73</b> -	Diagrama de carregamento determinado pela NBR 7190/97 .....	96
<b>Figura 74</b> -	Gráfico modelo do ensaio de tração da ligação. Diagrama força x deslizamento específico. Grupo 1 – CP7. ....	97
<b>Figura 75</b> -	Gráfico modelo do ensaio de tração da ligação. Diagrama força x deslizamento. Grupo 2 – CP9. ....	98
<b>Figura 76</b> -	Modo de ruptura por cisalhamento longitudinal e transversal .....	103

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Valores de $K_{mod,3}$ para Coníferas (para madeira classificada) .....	24
<b>Quadro 2</b> - Classe de Resistência de Coníferas .....	27
<b>Quadro 3</b> - Caracterização Cavilha de compósito estrutural .....	94
<b>Quadro 4</b> - Resultados obtidos para o Grupo 1 – Pré-fabricadas .....	99
<b>Quadro 5</b> - Resultados obtidos para o Grupo 2 – Moldadas <i>in situ</i> .....	99
<b>Quadro 6</b> - Resultados da resistência e da rigidez das ligações .....	101

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Eficiência de reforço de compósitos reforçados com fibras para diferentes orientações das fibras e em várias direções de aplicação da tensão .....	41
<b>Tabela 2</b> - Massa dos Corpos de prova.....	57
<b>Tabela 3</b> - Ensaio à tração das cavilhas.....	62
<b>Tabela 4</b> - Ensaio à tração cavilhas Tipo A e Tipo B.....	66
<b>Tabela 5</b> - Massa e dimensões dos Corpos de prova .....	68
<b>Tabela 6</b> - Pares de homogeneidade .....	81
<b>Tabela 7</b> - Composição dos corpos de prova .....	83
<b>Tabela 8</b> - Comparação dos resultados do ensaio com a literatura .....	102
<b>Tabela 9</b> - Valores críticos associados ao grau de confiança na amostra.....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Kmod	Coeficiente de Modificação
MOE	Módulo de elasticidade
MSR	<i>Machine Stress Rating'</i>
NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SPIB	<i>Southern Pine Inspection Bureau</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1	OBJETIVO DA PESQUISA .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1	MADEIRA <i>PINUS</i> SPP.....	20
2.2	PROCESSO PRODUTIVO DA MADEIRA SERRADA .....	21
2.2.1	Secagem da Madeira Serrada .....	22
2.2.2	Classificação da Madeira Serrada .....	23
2.2.2.1	Classificação visual .....	25
2.2.2.2	Classificação mecânica .....	26
2.3	PEÇAS DE SEÇÃO LAMINADA .....	28
2.4	EMENDA DAS LÂMINAS.....	31
2.4.1	Emendas Longitudinais .....	32
2.4.2	Emendas Transversais .....	34
2.4.2.1	Cavilhas, pregos e parafusos .....	35
2.5	COMPÓSITOS ESTRUTURAIS.....	36
2.5.1	Polímeros .....	36
2.5.2	Adesivo Epóxi .....	37
2.5.3	Endurecedor .....	38
2.5.4	Reforço .....	39
2.5.4.1	Fibras de vidro .....	42
2.6	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS.....	44
2.6.1	Moldagem Aberta .....	44
2.6.2	Moldagem Fechada .....	45
2.6.3	Moldagem Cilíndrica .....	46
2.6.4	Processos Contínuos.....	47
2.7	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	49
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	51
3.1	EXECUÇÃO E ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS.....	51
3.1.1	Materiais Compósitos Poliméricos.....	51

3.1.2	Determinação do projeto das Amostras.....	52
3.1.3	Fabricação das Amostras com <i>strain gages</i> .....	66
3.1.4	Preparação dos Corpos de Prova para Ensaio à Tração .....	69
3.1.5	Ensaio de caracterização das cavilhas com <i>Strain Gages</i> .....	73
3.2	EXECUÇÃO E ENSAIO À TRAÇÃO DO MODELO COM LIGAÇÕES DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS.....	75
3.2.1	Madeira.....	75
3.2.2	Classificação da Madeira.....	76
3.2.3	Execução dos Modelos.....	80
3.2.4	Concepção do Arranjo da Ligação por Compósito Estrutural .....	84
3.2.4.1	Cavilhas pré-fabricadas .....	85
3.2.4.2	Cavilhas curadas <i>in situ</i> .....	87
3.2.5	Equipamentos Utilizados .....	88
3.2.6	Ensaio à Tração da Emenda dos Modelos .....	89
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>91</b>
4.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS.....	91
4.1.1	Cálculo do Diâmetro da Cavilha .....	95
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO À TRAÇÃO DO MODELO COM LIGAÇÕES DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS .....	96
4.2.1	Resistência e Rigidez da Ligação.....	96
4.2.2	Comparação com a Literatura .....	100
4.2.3	Modo de Ruptura .....	102
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>104</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS</b> .....	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>108</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>113</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>121</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com os avanços tecnológicos, a indústria da arquitetura e engenharia no mundo tem buscado sistemas mais eficientes de construção no que diz respeito a aumentar a produtividade, diminuir o desperdício de materiais e atender a uma demanda crescente.

A produção de madeira para fins estruturais torna-se cada dia mais importante no contexto mundial, pois, a gradativa escassez de madeiras provenientes de florestas nativas e seu efeito na economia, associada ao fortalecimento dos conceitos de preservação ambiental, criou a necessidade do desenvolvimento de alternativas viáveis para a utilização racional de espécies provenientes de florestas plantadas (FIORELLI; DIAS; COIADO, 2009).

No Brasil, o solo e as condições climáticas (luz e umidade) são muito propícios para a plantação de florestas de *Pinus* spp., no entanto, como resultado do crescimento acelerado, a madeira proveniente dessas florestas apresenta defeitos naturais, tornando imprescindível a realização de uma classificação antes de ser utilizada estruturalmente (CARREIRA; DIAS, 2005).

Nesse contexto, o problema da pesquisa a ser desenvolvido é o Desempenho estrutural de ligações em vigas de madeira *Pinus* spp., de seção laminada, para serem utilizadas com comprimento estrutural (maiores que a dimensão comercial de três metros de comprimento). Almeja-se atingir esse comprimento estrutural através de emendas nas peças de madeira.

As ligações estudadas para emendas foram cavilhas elaboradas com compósito estrutural.

Uma possível utilização para estas vigas no contexto arquitetônico é como terças para coberturas. Uma vez que estas terças possuem comprimento estrutural superior, reduz-se o número de tesouras e pilares, proporcionando vãos maiores. Por consequência, traz-se uma economia significativa de materiais e a redução de custos desejada para o conjunto de estruturas do telhado, principalmente quando utilizada madeira de florestas plantadas (ROCCO LAHR *et al.*, 2016).

Tais terças podem ser utilizadas tanto em coberturas de construções rurais, como barracões, e também em residência, escolas, etc.

Na atualidade, o processo construtivo das coberturas vem sendo executado de maneira artesanal, ou seja, os próprios carpinteiros especificam as peças sem

nenhuma base de cálculo, muitas vezes ocasionando desperdício de madeiras provenientes de florestas nativas.

A utilização de madeira *Pinus* spp. na construção civil atenua o desmatamento dos ecossistemas florestais nativos. Como essa madeira possui propriedades mecânicas inferiores às madeiras que tradicionalmente são utilizadas (peroba, cumaru, etc.), é necessário agregar tecnologia para sua utilização.

Viabilizando seu uso em estruturas, agrega-se valor a esta matéria-prima com grande disponibilidade no mercado. Tendo em vista este objetivo, a presente pesquisa utilizou material compósito para as ligações das peças de madeira devido ao seu caráter precursor. Nos dias atuais, na indústria da construção civil, esse material vem sendo utilizado em reforço de estruturas.

O compósito estrutural é o material que combina as propriedades de dois ou mais materiais e são constituídos por duas fases, a fase matriz e a fase reforço. O que preencheu a fase matriz e a fase reforço neste trabalho foi a resina epóxi com endurecedor e a fibra de vidro, respectivamente.

Baseando-se nessas informações a respeito da madeira, bem como o material utilizado nas ligações, a questão do trabalho tem origem:

Qual é o desempenho estrutural das ligações de compósito estrutural em vigas de madeira laminada?

## 1.1 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa é estudar o desempenho estrutural de ligações cavilhadas de compósito estrutural em vigas de madeira laminada.

Para alcançar essa finalidade, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Compreender o desempenho mecânico de cavilhas de compósito estrutural através de sua caracterização;

- Definir o diâmetro das ligações cavilhadas, para viabilizar comparação dos resultados, quanto à resistência e rigidez das ligações com a literatura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MADEIRA *PINUS* SPP.

Segundo a EMBRAPA, o gênero *Pinus* engloba mais de 100 espécies e apesar de no Brasil o *Pinus* spp. estar sendo plantado há mais de um século e inicialmente utilizado para fins ornamentais, somente a partir da década de 1960 é que houve plantio em escala comercial, para ser usado principalmente nas indústrias de madeira serrada e laminada, de chapas, de resina, de celulose e papel.

O manejo de florestas plantadas com *Pinus* spp. vem suprindo o abastecimento da necessidade atual de madeira, assim, essa prática estabeleceu-se como uma importante aliada dos ecossistemas florestais naturais.

As espécies mais cultivadas e utilizadas no país foram *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, devido ao seu crescimento rápido e a facilidade de tratos para regenerar e melhorar os povoamentos florestais dessas espécies (SHIMIZU, 2008).

A grande concentração de plantios florestais de *Pinus* ocorre nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, onde estão localizadas as principais unidades industriais dos segmentos de celulose, papel, painéis de madeira, madeira serrada e siderurgia a carvão vegetal. Segundo Shimizu (2008, p.1), o *Pinus taeda* é encontrado no planalto da Região Sul, até o norte do Paraná, e o *Pinus elliottii*, na Região Sul como um todo, parte do Sudoeste, no Estado de São Paulo, e nas regiões serranas do sul de Minas Gerais.

Quanto à aparência, a madeira *Pinus* spp. possui cor clara, entre branco e amarelo.

A respeito das propriedades mecânicas, a espécie apresenta valores de 53,14 MPa a 79,97 MPa para módulo de ruptura a partir de plantios com idades de 9, 13 e 20 anos (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Ballarin e Lara Palma (2003) obtiveram no ensaio de flexão estática o módulo de ruptura de 107,02 MPa e módulo de elasticidade de 13.812 MPa a partir de árvores com 37 anos de idade, sendo observados valores superiores aos apresentados por Oliveira *et al.*, essa diferença pode ser explicada pela idade e, conseqüentemente, pelo fato do valor médio da massa específica ser de 0,605 g/cm<sup>3</sup> e 0,56 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

Além da sua tradicional utilização, de acordo com Moura, Pletz e Recco (2012, p.11), na construção civil também são utilizadas como acabamentos, perfis para esquadrias, peças estruturais, entre outros.

Atualmente, o desenvolvimento de produtos e processos que promovam a redução de custos e melhoria da qualidade dos sistemas construtivos e das habitações em geral está sendo cada vez mais necessário e dentre as soluções está a utilização de madeira *Pinus* spp. que, para Pfeil e Pfeil (2003), é competitiva economicamente e ao mesmo tempo sustentável, pois se baseia em técnicas modernas de reflorestamento associadas ao desenvolvimento de produtos industrializados de madeira com minimização de perdas.

Estudos sobre o comportamento mecânico da madeira *Pinus* spp. e seu uso em sistemas estruturais, como o apresentado nesta pesquisa, que utiliza peças de seção laminada e peças de seção composta, destacam-se por serem alternativas ao uso da madeira maciça.

## 2.2 PROCESSO PRODUTIVO DA MADEIRA SERRADA

Segundo Moura, Pletz e Recco (2012), o processo produtivo de madeira *Pinus* spp. serrada se inicia com o recebimento das toras pela indústria, onde o controle é realizado por meio da pesagem do caminhão. Em seguida, a matéria-prima é empilhada no pátio de toras.

Elas são descascadas e classificadas, após esse processo, que gera subprodutos (cascas e resíduos) que são picados e usados para o abastecimento da caldeira da estufa de secagem, a matéria-prima é encaminhada para a mesa de entrada da serraria.

Nesse local, as máquinas operam de maneira contínua, primeiramente as toras são desdobradas em tábuas, com dimensões que variam de acordo com sua futura utilização, em seguida é realizada a classificação das peças de acordo com suas bitolas e finalmente ocorre o gradeamento da madeira serrada, que é armazenada no pátio de madeira verde sobre paletes. A empilhadeira realiza a movimentação das grades e a formação das pilhas.

O pátio de madeira verde geralmente localiza-se na entrada das câmaras de secagem, facilitando esse processo. Na saída das câmaras, normalmente situa-se o

pátio de acondicionamento, local onde a madeira é armazenada durante um dia para seu resfriamento e liberação das tensões de secagem.

### 2.2.1 Secagem da Madeira Serrada

Considerada a etapa mais importante do processo produtivo da madeira serrada, tem como objetivo agregar valor à matéria-prima por meio do aumento da qualidade do produto final.

Dentre as vantagens que a secagem proporciona destaca-se: Redução do ataque de fungos, diminuição da alteração das dimensões das peças serradas, redução da umidade, aumento da aderência a adesivos e fixação em ligações com pinos metálicos, além do aumento da resistência à compressão, cisalhamento e flexão estática.

A madeira serrada apresenta índices de umidade irregulares que podem causar danos à peça de madeira quando utilizada nessa condição. A fim de evitá-los, é importante que o processo de secagem seja realizado (RECCO, 2015).

O processo de secagem adequado é caracterizado por evitar o surgimento de defeitos na madeira, tais como: empenamento, colapso, endurecimento superficial, rachaduras, manchas e defeitos da grã.

Quanto aos tipos de secagem, estas podem ser realizadas naturalmente, ao ar livre, ou artificialmente, com o uso de estufas. A secagem em estufas se destaca por demandar menos tempo em relação à secagem ao ar livre (de acordo com Recco, 2015, ao ar livre o período de secagem varia de 30 a 90 dias enquanto que, em estufas, esse prazo é menos de uma semana), além de ser um processo controlado que garante o teor e umidade final e a uniformidade da madeira.

Estufas são espaços hermeticamente fechados e equipados com sistemas de circulação do ar, sistema de aquecimento e sistema de controle da umidade relativa do ar (UR) (MOURA; PLETZ; RECCO, 2012).

Para se obter uma adequada secagem da madeira serrada, é importante que o processo seja definido por uma empresa ou profissional técnico e que sejam utilizados equipamentos e dispositivos de controle específicos.

O tempo de secagem da madeira *Pinus* spp. depende da temperatura, umidade relativa do ar e circulação do ar. O processo está diretamente ligado à

estrutura celular da madeira, pois espécies com estrutura celular mais simples, como as coníferas, secam mais rápido que outros tipos de madeira.

De acordo com Moura, Pletz e Recco (2012), um programa típico de secagem apresenta três fases: Aquecimento, Secagem e Acondicionamento.

Na fase de aquecimento, a madeira é aquecida até a temperatura de secagem de uma forma gradual, mantendo a umidade relativa elevada (acima de 90%), o tempo de aquecimento indicado é de 1h por centímetro de espessura para a madeira *Pinus* spp.

Devido à rapidez da secagem artificial, esta pode danificar seriamente a madeira se alguns cuidados não forem tomados, sendo assim, acima do ponto de saturação das fibras (PSF), em torno de 30%, devem-se evitar temperaturas muito elevadas, na zona próxima ao PSF, deve-se deixar o ar mais seco no interior da câmara e, abaixo do PSF, pode-se elevar a temperatura até atingir a umidade final desejada.

A fase de acondicionamento é constituída por dois processos: etapa de equalização, em que o objetivo é uniformizar o teor de umidade em cada peça; e etapa de acondicionamento, que visa amenizar o gradiente de umidade e aliviar as tensões internas da madeira.

### 2.2.2 Classificação da Madeira Serrada

Outra etapa do processo produtivo da madeira serrada de grande importância, quando se trata de sua aplicação para fins estruturais como a utilizada neste trabalho, é a classificação.

A utilização estrutural de madeira serrada oriunda de florestas plantadas apresenta grande potencial de expansão no Brasil, pois nossas condições climáticas (luz e umidade) são altamente favoráveis para o desenvolvimento de florestas de *Pinus*, que devido ao seu crescimento acelerado, apresenta baixa densidade e possui nós, muitas vezes decorrentes do manejo (CARREIRA; DIAS, 2005).

A madeira *Pinus* spp. apresenta variações nas propriedades físicas e mecânicas e, para que se consiga um máximo aproveitamento da madeira, é necessário que elas sejam agrupadas em classes de acordo com semelhança de propriedades, para que seu uso mais apropriado seja definido.

De acordo com Moura, Pletz e Recco (2012), classificar a madeira serrada significa que as peças que apresentem classe de resistência e rigidez semelhantes, estarão em um mesmo grupo homogêneo de qualidade.

Dentre as vantagens em se classificar a madeira serrada, destaca-se obter um projeto mais econômico e seguro, já que o calculista tem conhecimento de antemão das propriedades mecânicas da madeira, ou seja, “a adequação das peças mais solicitadas à aquelas de propriedades mecânicas mais elevadas trará economia e uniformidade à estrutura, além de proporcionar menos desperdício” (MOURA; PLETZ; RECCO, 2012).

Os tipos de classificação da madeira serrada são: classificação visual e classificação mecânica não destrutiva.

A classificação é realizada através de normas regulamentadoras e manuais de classificação. De acordo com o projeto de revisão da norma nacional Projetos de estruturas de madeira, NBR 7190 (ABNT, 2010), não é permitido o uso de madeira de conífera não-classificada. Essa norma apresenta um coeficiente de minoração da resistência ( $K_{mod,3}$ ) que leva em consideração a qualidade da madeira. A norma relata a importância de se realizar não somente a classificação visual de todas as peças estruturais por meio do método visual, mas também a classificação mecânica não destrutiva, que garante a homogeneidade da rigidez das peças que compõem o lote de madeira a ser empregado.

No quadro 1, são apresentados os valores de  $K_{mod,3}$  para as coníferas de acordo com a classe (descrito pelo nível de qualidade visual, seguido da densidade) e o tipo de classificação realizada.

**Quadro 1** - Valores de  $K_{mod,3}$  para Coníferas (para madeira classificada)

Classificação	Classe	Tipo de classificação	
		Apenas visual	Visual e mecânica
Densas (D)	SE-D	0,70	0,90
	S1-D	0,60	0,80
	S2-D	0,50	0,70
	S3-D	0,40	0,60
Não-Densas (ND)	SE-ND	0,60	0,80
	S1-ND	0,50	0,70
	S2-ND	0,40	0,60
	S3-ND	0,30	0,50

**Fonte:** Projeto de revisão da NBR 7190/97: Projetos de estruturas de madeira (ABNT, 2010)

### 2.2.2.1 Classificação visual

A classificação visual consiste em examinar cada peça, observando o tipo, localização e tamanho dos defeitos e nós que afetam a resistência estrutural. Segundo Carreira e Dias (2005), ela é baseada no princípio de que as propriedades mecânicas de uma peça estrutural diferem das propriedades mecânicas de corpos de prova isentos de defeitos em função da presença de características de crescimento, e que tais características podem ser observadas e avaliadas visualmente pelo classificador. Com o auxílio de manuais e normas com regras de classificação, estas características de crescimento são usadas para separar a madeira em classes de qualidade.

De acordo com a classificação visual das regras do *Southern Pine Inspection Bureau* (organização dedicada à manutenção de normas de qualidade do *Southern Pine* nos Estados Unidos) - SPIB (1994), fundamentada na norma americana ASTM D245 (1993), o gênero *Pinus* spp. faz parte do grupo *Southern Pine*.

Carreira e Dias (2005) propuseram um método de classificação visual para a madeira do gênero *Pinus* spp., baseado no *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB) dos EUA. As peças foram classificadas em quatro níveis de resistência e testadas à flexão estática em relação ao eixo de maior inércia, assim determinou-se a resistência e a rigidez de cada uma das quatro classes. Concluíram que este método mostrou-se adequado para ser aplicado nas peças de madeira *Pinus* spp. plantadas no Brasil.

A classificação visual é realizada pelo exame das quatro faces e das duas extremidades (seções transversais) de cada peça. Nas faces são avaliados, por todo o comprimento das peças, a localização e a natureza dos nós, inclinação de fibras, empenamentos e fendas, atribuindo-se um nível de qualidade visual em função da dimensão destes defeitos. Nas extremidades das peças avalia-se a quantidade de anéis, concomitantemente à quantidade de madeira de inverno presente em 2,5 cm medidos em uma linha radial representativa, atribuindo à peça de madeira um nível de densidade. Portanto, a classificação visual avalia tanto a qualidade visual, denotada pela quantidade de defeitos quanto à densidade da madeira. Com relação aos defeitos, a classificação visual da madeira pelo método norte americano é feita comparando-se os limites estabelecidos para os defeitos em cada classe com a medida dos maiores defeitos presentes nas peças (CARREIRA; DIAS, 2005, p.80).

Segundo o Manual de Classificação Visual de Peças Estruturais de Madeira Tipo *Pinus*, coordenado por Moura, Pletz (2012), elaborado de acordo com a norma brasileira NBR 11700 e as normas americanas ASTM D245/93 e SOUTHERN PINE

1994, a qualidade visual da madeira é definida em quatro níveis: Classe Estrutural Especial (EE); Classe Estrutural nº1; Classe Estrutural nº2; Classe Estrutural nº3.

A classe EE é recomendada para aplicações nas quais se requerem valores elevados para as propriedades de resistência e rigidez bem como a boa aparência. A classe nº1 para edificações nas quais se requerem valores elevados para as propriedades de resistência e rigidez bem como a boa aparência. Já a classe nº2 é recomendada para aplicações gerais em edificações nas quais se requerem valores moderados para as propriedades de resistência e rigidez e, por fim, a classe nº3 para aplicações gerais em edificações nas quais se permitem valores baixos para as propriedades de resistência e rigidez, sendo que a aparência não é um fator importante.

Além destes níveis de qualidade visual, a classe também é descrita pela densidade, sendo que a madeira pode ser considerada Densa (D) ou Não-Densa (ND), conforme a figura 1, a seguir:

**Figura 1** - Parâmetros para densidade da madeira *Pinus* spp.

<p><b>Madeira Densa (D)</b></p>	<p>- Apresenta 6 ou mais anéis de inverno em um comprimento radial de 2,5 cm, tendo no seu total 1/3 de madeira de inverno. - Apresenta 4 ou mais anéis de inverno em um comprimento radial de 2,5 cm, tendo no seu total 1/2 de madeira de inverno.</p>
<p><b>Madeira Não-Densa (ND)</b></p>	<p>- Aquela que possui menos de 4 anéis.</p>

**Fonte:** Moura; Pletz (2012)

Ao todo, segundo este manual, pode-se definir até oito classes. EE-D, EE-ND, nº1-D, nº1-ND, nº2-D, nº2-ND, nº3-D, nº3-ND.

#### 2.2.2.2 Classificação mecânica

A classificação mecânica é realizada por meio de um estimador para avaliar a resistência da madeira. Entre os estimadores mais utilizados destacam-se a densidade e a rigidez à flexão.

A Literatura demonstra que a classificação mecânica é o método mais adequado, pois não depende do senso humano. O processo de classificação mecânica é baseado em relações empíricas entre o módulo de elasticidade e a resistência á flexão mediante um método não destrutivo, que permite a classificação de cada peça em uma categoria de resistência, conforme o quadro 2.

**Quadro 2 - Classe de Resistência de Coníferas**

Coníferas (Valores na condição-padrão de referência U = 12 %)				
Classes	$f_{c0,k}$ MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{aparente}$ kg/m <sup>3</sup>
C20	20	4	3500	500
C25	25	5	8500	550
C30	30	6	14500	600

**Fonte:** Projeto de revisão da NBR 7190/97: Projetos de estruturas de madeira (ABNT, 2010)

Alguns métodos de classificação mecânica não destrutiva são: Flexão estática, MSR (*Machine Stress Rating*), método de vibração transversal, *stress-wave* e ultrassom (FIORELLI, 2005).

A classificação mecânica estática da madeira pode ser realizada através do ensaio conhecido como teste de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia, que consiste em um processo executado em máquinas, onde as peças são submetidas ao equipamento e recebem uma carga conhecida. Automaticamente, o equipamento faz a leitura da deflexão. De acordo com a faixa que caracteriza as classes de resistência, essas peças são classificadas (GONÇALVES; BARTHOLOMEU, 2000).

Outra técnica que se destaca é a classificação mecânica dinâmica por ultrassom devido ao baixo custo de aquisição do equipamento, se comparado ao das máquinas de classificação automática e o treinamento relativamente simples da mão de obra para utilização deste equipamento.

Oliveira *et al.* (2003), em seu trabalho, compararam os resultados obtidos pela técnica de ultrassom para determinar as propriedades mecânicas da madeira com resultados obtidos em ensaios destrutivos, os quais fornecem parâmetros de correlação significativos. O objetivo do trabalho foi investigar o uso da técnica de ultrassom para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) pelo processo da comparação com ensaio de flexão estática (MOE), o coeficiente de determinação

obtido ( $r^2 = 0,83$ ) permite afirmar que o método não destrutivo por meio de ultrassom pode ser utilizado para avaliar as propriedades mecânicas de coníferas com dimensões estruturais de forma eficaz. Sendo assim, os autores concluem que este método não destrutivo pode ser utilizado na classificação de peças estruturais de madeira de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* com resultados confiáveis.

O Ultrassom utiliza a velocidade de propagação de uma onda sonora de alta frequência ( $\geq 20 \text{ KHz}$ ) para medir a rigidez da madeira (ROSS *et al.*, 1990). A velocidade  $C$  em que a onda atravessa a peça de madeira e as suas propriedades mecânicas, dependem da presença de nós e defeitos nas peças, assim como, da inclinação das fibras e é dado pela seguinte equação:

$$C = \frac{2 \cdot L}{\Delta t} \quad (\text{eq. 1})$$

Em que:

$L$  = Distância entre os pontos de emissão e recepção da onda em m;

$\Delta t$  = Tempo decorrido para a onda atravessar a madeira em s.

O valor do Módulo de elasticidade pode ser determinado com a seguinte equação:

$$MOE = C^2 \cdot \rho \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo:

$C$  = Velocidade de propagação da onda, em m/s;

$\rho$  = Densidade da madeira, em Kg/m<sup>3</sup>.

### 2.3 PEÇAS DE SEÇÃO LAMINADA

No Brasil, peças pré-fabricadas de madeira ainda são relativamente pouco empregadas e possuem necessidade de estudos experimentais, os quais contribuem para a viabilização e maior utilização deste produto.

Dentre as soluções possíveis para vigas de coberturas se destacam as peças de seção laminada, como uma alternativa ao uso de madeira maciça, mantendo o mesmo aspecto externo.

Quanto à madeira laminada, esta é um produto estrutural, formado por associação de lâminas de madeira selecionada, com um ou mais elementos de

ligação. Sendo que as fibras das lâminas têm direções paralelas ao eixo longitudinal da peça produzida (PFEIL; PFEIL, 2003).

Apesar da técnica construtiva de madeira laminada colada ser difundida e conhecida há pouco tempo, sua patente data de 1906 pelo alemão Otto Hetzer. De acordo com Duarte (2004), as lâminas utilizadas devem ser secadas em condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar a fim de evitar a retração da madeira e defeitos nas peças.

Esse sistema permite obter elementos de formas e tamanhos variados, já que são elaborados a partir de peças com dimensões comerciais. Sendo assim, as lâminas podem ser emendadas nas extremidades, formando peças de grandes dimensões.

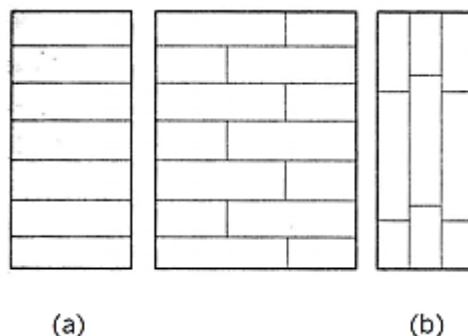
O sistema é fabricado a partir de lâminas de pouca espessura, portanto, seus defeitos naturais, como os nós e furos provocados por insetos, podem ser eliminados ou dispersados nas peças (DUARTE, 2004).

De acordo com a NBR 7190/97, as peças de madeira laminada devem ser formadas por lâminas com espessura não superior a 3,0 cm.

É importante que a espessura das lâminas seja constante ao longo de todo o comprimento a fim de assegurar uma boa qualidade da colagem, assim, a variação na espessura das lâminas nunca deve ser superior a 0,5 mm (CARRASCO, 2002).

Para Recco (2015 apud Bono, 1996), existem duas possibilidades de se realizar a laminação (figura 2): horizontal, com as lâminas posicionadas paralelamente ao plano neutro de flexão e vertical, com as lâminas posicionadas perpendicularmente ao plano neutro de flexão.

**Figura 2** - Tipo de laminação: horizontal (a) e vertical (b)



Fonte: Bono (1996)

A configuração das peças laminadas horizontalmente permite uma seção mais econômica e resistente através da disposição seletiva das lâminas em função dos esforços atuantes e das suas propriedades resistentes (DUARTE, 2004).

Porém, em casos de madeira laminada pregada (MLP), a configuração das peças laminadas verticalmente possui vantagens em relação às ligações. Uma vez que podem ser realizadas por pregos de menor comprimento, facilitando a execução do conjunto, já que o número de lâminas atravessadas pelos pregos metálicos é inferior ao que se apresenta na outra disposição (horizontalmente).

Segundo Pfeil e Pfeil (2003, p.14), as vantagens das peças de seção laminada em relação às de seção maciça são:

- Permite a confecção de peças de grandes dimensões (as dimensões comerciais da madeira serrada são limitadas);
- Permite melhor controle de umidade das lâminas, reduzindo defeitos provenientes de secagem irregular;
- Permite a seleção da qualidade das lâminas situadas nas posições de maiores tensões;
- Permite a construção de peças com várias formas, por exemplo: arcos, tribunas, cascas, etc.

Outras vantagens e características importantes deste sistema são a facilidade de execução e o baixo custo, possibilidade de alcance de grandes vãos, maior aproveitamento da tora e redução da possibilidade de presença de defeitos (GÓES, 2002).

Quanto às ligações em peças de seção laminada, vários fatores influenciam sua rigidez, tais como: o tipo de ligação, a quantidade e o espaçamento entre elas, além das propriedades mecânicas da espécie de madeira utilizada.

Atualmente existem vários tipos de ligação que podem ser empregados para a emenda das peças. A literatura demonstra que elas são classificadas em dois grupos: uniões mecânicas e uniões adesivas (FAN, 2012).

As uniões adesivas são consideradas "uniões rígidas", ou seja, não proporcionam deslizamentos significantes entre as partes unidas, por outro lado, as uniões mecânicas são naturalmente deformáveis, e suas deformações devem ser computadas no cálculo estrutural (GÓES, 2002).

Recco, Pletz e Moura (2014), em seu trabalho compararam os resultados obtidos para diferentes ligações em peças de madeira *Pinus* spp. no sistema de

caibro treliçado em MLP (Madeira laminada pregada). O objetivo do trabalho foi demonstrar a viabilidade estrutural do sistema de caibro treliçado em MLP por intermédio da análise experimental para emprego em projetos habitacionais, investigando três tipos de ligações: prego liso, prego liso com ponta dobrada e prego ardox.

Os autores concluem que nas vigas laminadas pregadas revela-se necessário garantir um espaçamento mínimo entre as emendas consecutivas de duas lâminas componentes, determinado a partir do nível de tensões aplicadas e que as ligações com prego liso apresentaram o pior desempenho, tanto de resistência quanto de rigidez. As ligações de pregos lisos com ponta dobrada obtiveram os melhores resultados de rigidez enquanto que as ligações com prego ardox, os melhores resultados de resistência. Esses dois últimos tipos de ligações apresentam desempenhos próximos entre si e superiores aos apresentados pelos pregos lisos.

#### 2.4 EMENDA DAS LÂMINAS

O estudo das emendas em estruturas de madeira é amplo e complexo. Exige um conhecimento integrado da madeira, dos elementos de ligação existentes e disponíveis no mercado, das formas e espaçamentos possíveis de dispor esses elementos, do potencial da mão de obra e das máquinas (DUARTE, 2004).

As emendas nas peças de madeira são necessárias quando se almeja atingir grandes dimensões através de peças com medidas comerciais, que, como exposto anteriormente, possuem espessura das lâminas de 1,5 cm a 3,0 cm e geralmente com comprimento longitudinal em torno de 3,0 m.

As dimensões comerciais da seção transversal e do comprimento são limitadas pela dimensão das árvores da espécie *Pinus* spp. e pelas dificuldades de transporte.

As vigas, de seção laminada, utilizadas nesta pesquisa possuem emendas longitudinais e transversais nas peças de madeira que as permitem atingir comprimentos estruturais maiores.

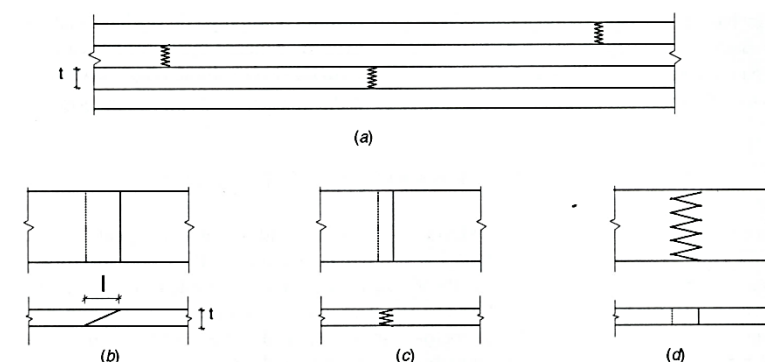
As emendas longitudinais ocorrem ao longo do comprimento de cada lâmina da seção laminada e é importante destacar que essas emendas devem estar descontraídas a fim de evitar uma zona de frágil rigidez na viga.

Já as emendas transversais ocorrem na seção transversal da viga e são objeto de estudo deste trabalho (cavilha pré-fabricada de compósito estrutural e cavilha de compósito estrutural curada *in situ*).

#### 2.4.1 Emendas Longitudinais

As emendas longitudinais geralmente são executadas como um dos detalhes da figura 3: emenda biselada (corte em chanfro), emenda dentada vertical (*finger joint* vertical) ou emenda dentada horizontal (*finger joint* horizontal).

**Figura 3** - Detalhes de emendas de lâminas; (a) distribuição das emendas na direção longitudinal; (b) junta por corte em chanfro; (c) emenda dentada vertical; (d) emenda dentada horizontal



Fonte: Pfeil; Pfeil (2003)

As emendas dentadas são mais eficientes que as emendas de chanfro (em que sua eficiência varia de acordo com a inclinação do bisel), além de serem mais compactas e ter como principal vantagem a maior área de colagem.

Além dessas emendas, também é possível produzir emendas de topo que são mais fáceis de executar, porém possuem baixa resistência.

No trabalho de Cheung *et al.* (2002), 28 peças de madeira *Pinus taeda* com emendas dentadas foram ensaiadas à tração paralela das fibras, sendo 14 peças com emendas dentadas verticais e 14 com emendas dentadas horizontais. Em ambos os casos foi utilizado adesivo Resorcinol-Formaldeído (CASCOHEN RS-216-M). Para avaliar a eficiência dessas emendas, também foram testadas 14 peças de mesma seção transversal, contudo sem emendas. Sendo considerado um nível de significância de 5%, os resultados das emendas dentadas verticais e horizontais são

similares. Foi constatado, no entanto que essas emendas apresentaram uma eficiência de aproximadamente 80% a mais que a da madeira sem emendas.

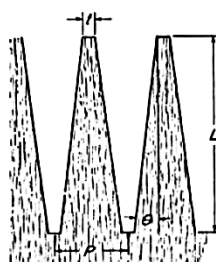
A Norma Brasileira NBR 7190 (1997) indica as reduções que devem ser feitas na resistência das peças de MLC conforme o tipo de emendas utilizadas (DUARTE, 2004).

As emendas *finger joint* são elaboradas a partir de cinco estágios: 1) seleção e preparação do material; 2) formação da emenda dentada; 3) aplicação do adesivo; 4) montagem da emenda e 5) cura do adesivo (JOKERST, 1981).

Hoje em dia, recomenda-se a utilização desse tipo de emenda por parte dos produtores de madeira laminada, devido ao fato dela reunir vantagens em relação à boa resistência e praticidade de produção (FIORELLI, 2005).

A Figura 4 apresenta os parâmetros geométricos da emenda dentada.

**Figura 4** - Parâmetros geométricos das emendas dentadas



**Parâmetro**

L = comprimento.

P = largura do dente.

t = largura da ponta do dente.

$\theta$  = inclinação.

**Fonte:** Jokerst (1981)

O corte em cunhas dentadas se faz com máquinas de grande eficiência. O comprimento das cunhas varia de 10 a 60 mm e em sua inclinação de 1/7 a 1/10 (PFEIL; PFEIL, 2003).

A literatura demonstra a utilização de diferentes valores para o comprimento dos dentes, sendo que, de acordo com a versão revisada em 2011 da norma brasileira NBR 7190, são recomendados os comprimentos de 21 mm e 28 mm para os entalhes. Na América do Norte, o comprimento do dente mais utilizado é de 28,27 mm (HERNANDEZ, 1998). A norma Alemã DIN 68140 recomenda comprimento do dente igual a 20 mm para as peças de madeira laminada (AMAYA, 2013).

Quanto ao adesivo, os tipos de cola utilizados nas emendas dentadas são primordiais à durabilidade da viga. Para utilização em ambiente protegido de variação de umidade, é possível utilizar o acetato de polivinila (PVA), já para

sistemas sujeitos à variação de umidade ou expostas ao tempo são indicadas colas sintéticas, de fenol-formaldeído ou resorcinol-formaldeído.

Além disso, o adesivo deve ser compatível com a espécie de madeira utilizada, proporcionando uma colagem segura da emenda. A versão de 2011 da norma ABNT NBR 7190 recomenda que seja adesivo estrutural. A norma NBR 7190: 1997 recomenda adesivos à prova d'água e à base de fenol-formaldeído sob pressão.

Após a aplicação do adesivo na emenda, é realizada a aplicação de pressão na junta. A revisão de 2011 da norma NBR 7190 recomenda pressão mínima de 0,7 MPa para madeiras de densidade inferior ou igual a 0,5 g/cm<sup>3</sup> e de 1,2 MPa para madeiras de densidade superior a 0,5 g/cm<sup>3</sup>, na ausência de recomendações do fabricante da cola.

#### 2.4.2 Emendas Transversais

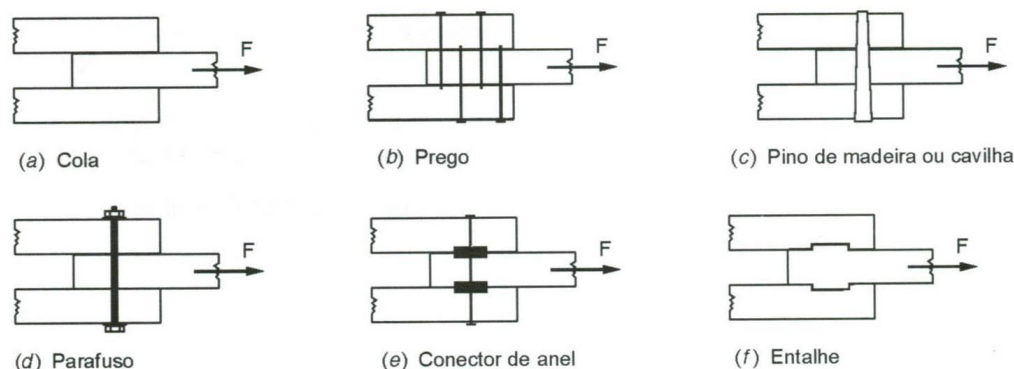
Para confeccionar estruturas, as peças de madeira são ligadas entre si. Existem três tipos de ligações transversais entre peças de madeira: ligações por contato, ligações coladas e ligações mecânicas.

As ligações por contato se originam pelo encaixe dos elementos de madeira, que trabalham à compressão associada ao corte. Esse tipo de ligação não garante a continuidade da estrutura, para que isto ocorra é necessária à utilização conjunta de outro tipo de ligação. Um exemplo de ligação por contato é o entalhe.

Ligações coladas são formadas a partir da colagem das peças de madeira com um adesivo. Esse tipo de ligação possui elevada resistência e rigidez. Entretanto, sua eficiência está relacionada ao adesivo utilizado e ao processo de fabricação. Segundo Pfeil e Pfeil (2003), em geral a colagem é utilizada nas fábricas de peças de madeira laminada e compensada, onde há um controle da cola, da umidade da madeira, da pressão e da temperatura, assim sendo, no canteiro de obras as ligações não costumam ser coladas.

Já as ligações mecânicas são aquelas nas quais há penetração do elemento de ligação nas peças de madeira. Alguns exemplos são: parafusos, pregos, cavilhas. Pode-se também utilizar uma combinação destas ligações com o objetivo de aumentar sua resistência e ductilidade (DUARTE, 2004).

**Figura 5 - Tipos de ligações estruturais de peças de madeira**



**Fonte:** Pfeil; Pfeil (2003)

Apesar da indiscutível eficiência dos adesivos, existem maiores dificuldades na sua aplicação, o que torna os pregos os elementos de ligação mais utilizados no Brasil, devido à facilidade de aplicação e baixo custo (GÓES; DIAS, 2005).

#### 2.4.2.1 Cavilhas, pregos e parafusos

Os pregos e parafusos são englobados na categoria de pinos metálicos, devido ao seu comportamento semelhante (PFEIL; PFEIL, 2003).

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), os pregos são peças metálicas, cravadas na madeira com impacto e as cavilhas são eixos cilíndricos colocados em furos feitos à máquina, com diâmetro ligeiramente inferior ao deles.

De acordo com Almeida (2019), para cada tipo de elemento de ligação empregado nas estruturas de madeira, recomenda-se realizar o dimensionamento dos furos, espaçamento e diâmetro dos conectores. Os cálculos devem ser elaborados de acordo com parâmetros das normas em vigor.

Pfeil e Pfeil (2003) relatam quais são os principais requisitos dos elementos de ligação: a resistência (ligações devem ter eficiência na transmissão de forças de uma peça de madeira para outra) e a rigidez (o deslizamento entre as peças ligadas deve ser restringido para não prejudicar o funcionamento da estrutura).

Em estruturas de madeira, as emendas frequentemente representam os pontos mais fracos e, portanto, necessitam de atenção especial. O comportamento mecânico entre o elemento de ligação e a madeira depende de vários fatores, incluindo as propriedades geométricas e mecânicas do componente fixador, as

propriedades físicas da madeira e a interação entre esses elementos (Izzi *et al.*, 2018).

## 2.5 COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

Os sistemas compósitos foram desenvolvidos no século XX com o objetivo de criar materiais capazes de ultrapassar algumas limitações dos materiais tradicionais, essa técnica fácil e de simples execução tem a capacidade de melhorar as propriedades mecânicas dos elementos que a compõe (BRANCO; SANTOS; CRUZ, 2008, p.7).

Entende-se como compósito o material que combina as propriedades de dois ou mais materiais, de uma mesma classe ou classes distintas. Geralmente os compósitos são constituídos por duas fases, a fase matriz e a fase reforço.

O que preenche a fase matriz dos compósitos são metais, cerâmicas ou polímeros. Dentre as funções da fase matriz, podem-se destacar: atuar como meio de transmissão e distribuição das tensões para as fibras, proteger as fibras de um processo de abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente e separar as fibras umas das outras prevenindo a propagação de trincas de uma fibra para a outra (CALLISTER JR., 2012, p.483).

Segundo Callister Jr. (2012, p.483), a fase reforço é agrupada em três classificações em relação ao diâmetro e a sua natureza: úsqueres (monocristais finos com razões comprimento-diâmetro muito grandes, exemplos: grafita, carbetto de silício), fibras (possuem pequenos diâmetros, exemplos: vidro, carbono, aramidas) e arames (diâmetros relativamente grandes, exemplos: aço, tungstênio).

As características dos compósitos se dão a partir de uma função das propriedades destas fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase reforço (forma, tamanho, distribuição e orientação das partículas) (CALLISTER JR., 2012, p.472).

### 2.5.1 Polímeros

Os polímeros geralmente são utilizados como matriz de compósitos em aplicações estruturais em função das suas propriedades à temperatura ambiente, da

sua facilidade de fabricação e do seu custo em relação aos compósitos com matriz metálica (CALLISTER JR., 2012, p.484).

Os polímeros podem ser classificados como termoplásticos e termorrígidos, a depender de sua matriz polimérica.

Adesivos termorrígidos ou termofixos são os que sofrem transformação irreversível, endurecendo por meio de reações químicas ativadas pela temperatura ou endurecedores. Possui grande resistência à umidade e ao calor. Dentre eles pode-se destacar: resorcinol-formaldeído, fenol-formaldeído, ureia formaldeído, poliuretanos e epóxi (FIORELLI, 2002).

Já os adesivos termoplásticos amolecem e fluem quando calor e pressão são aplicados, tornando a solidificar ao serem resfriados, sendo assim trabalham em mudanças reversíveis (DE E WHITE, 1996). Os adesivos que se enquadram neste grupo são: adesivos animais, albumina de sangue, soja, tanino (FIORELLI, 2002).

A literatura demonstra que no reforço de estruturas utilizam-se matrizes termorrígidas, uma vez que elas têm melhor resistência a agentes químicos, reduzida fluência e perda de tensões por relaxamento, e ainda é um material sem grandes variações com ações de temperatura (CRUZ, 2015).

De acordo com Mendonça (2001), as resinas termorrígidas mais utilizadas por serem as menos afetadas quando submetidas à variação de temperatura são a epóxi e a poliéster.

Segundo Boyle, Martin e Neuner (2001, p.78), as resinas epóxi são utilizadas em aplicações estruturais, porque oferecem uma única combinação de propriedades que são inatingíveis com outras resinas termorrígidas.

Ainda neste contexto, Callister Jr. (2012, p.487) relata que as resinas epóxi são amplamente utilizadas em aplicações aeroespaciais por possuírem melhores propriedades mecânicas e maior resistência à umidade do que as resinas poliésteres e vinílicas.

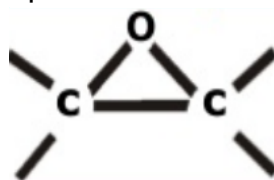
Neste trabalho para as ligações em peças de madeira *Pinus* spp. foi utilizada resina epóxi como matriz termorrígida.

### 2.5.2 Adesivo Epóxi

De acordo com Boyle, Martin e Neuner (2001, p.78), as resinas epóxi se caracterizam como uma molécula contendo um átomo de oxigênio e dois de

carbono, sendo que, a base molecular para a qual se encontra ligada pode variar amplamente.

**Figura 6** -  
Estrutura química  
básica do grupo  
epóxi



**Fonte:** A própria  
autora

A propriedade mais particular das resinas epóxi é sua capacidade de se transformar a partir do estado líquido em um sólido termorrígido. A viscosidade é então parâmetro de particular importância em resinas líquidas (FIORELLI, 2002).

As vantagens em se utilizar o adesivo epóxi são: alta resistência (à tração e à compressão), excelente adesão com vários substratos, resistência a solventes e baixa toxicidade (BOYLE; MARTIN; NEUNER, 2001, p.78).

Ao selecionar uma resina, suas características (resistência à tração, compressão, deformações, viscosidade, etc.) são fornecidas pelo fabricante, o que dita o seu uso.

Para se alcançar os melhores resultados possíveis de aderência na aplicação, deve-se considerar que o adesivo epóxi precisa impregnar a superfície da madeira e ter um comportamento similar aos materiais a unir. A superfície da madeira deverá ser preparada para a colagem (realizando uma limpeza para a retirada do pó da própria madeira) (CRUZ, 2015).

O adesivo epóxi é formado por três elementos básicos: resina base, agente de cura (ou endurecedor) e aditivos (ou modificadores) (BOYLE; MARTIN; NEUNER, 2001, p.78).

### 2.5.3 Endurecedor

A fim de que se otimize o processo de cura da resina, pode ser utilizado um endurecedor, que deve ser compatível com a resina base escolhida. Esta escolha vai depender da viscosidade, tempo de cura ou aparência desejada.

De acordo com Boyle, Martin e Neuner (2001, p.80), entre as classes químicas de endurecedores, as mais comuns são aminas e anidridos.

Segundo esses autores, a reação de cura da resina é uma reação exotérmica e pode ocorrer à temperatura ambiente, a temperaturas elevadas ou com a utilização de radiação ultravioleta, sendo assim o tempo de cura pode variar de segundos a dias.

Já os adesivos constituídos por resina e endurecedor, fornecem uma excelente penetração a todos os tipos de fibras, pois possuem uma viscosidade extremamente baixa e manuseio semelhante a uma resina poliéster. Esse sistema de resina com endurecedor não desenvolve uma superfície pegajosa após o processo de cura (FIORELLI, 2002).

#### 2.5.4 Reforço

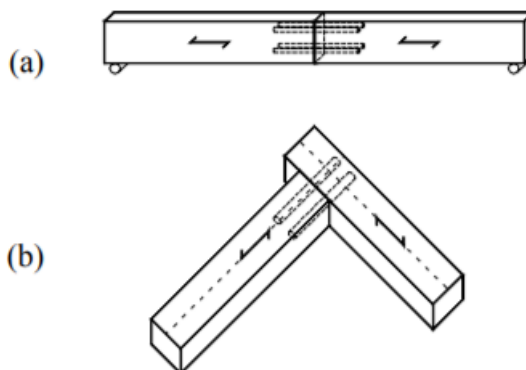
Quanto à fase Reforço dos compósitos, o que o preenche e confere novas características ao polímero para aplicações estruturais são as fibras. O uso de compósitos reforçados com fibras ou polímeros reforçados por fibras (FRP) destacam-se por possuírem propriedades mecânicas de resistência e de rigidez elevadas em relação ao peso do material.

Portanto, para além da matriz, as fibras constituem a outra fase dos compósitos de alto desempenho, tendo como principal função o reforço da matriz através da estimulação de tensões quando o compósito é solicitado (CRUZ, 2015).

O uso de materiais compósitos ou polímeros reforçados com fibras (FRP) em estruturas de madeira tem dois fins principais: a união entre peças e o reforço de ligações e estruturas danificadas (BRANCO; SANTOS; CRUZ, 2008, p.7).

No primeiro caso, a realização da união entre elementos pode ser realizada por meio de varões compósitos (pré-fabricados ou pré-impregnados), que é muito semelhante à utilização de varões metálicos ou impregnados *in-situ*, em que o compósito é aplicado e curado dentro das peças a unir.

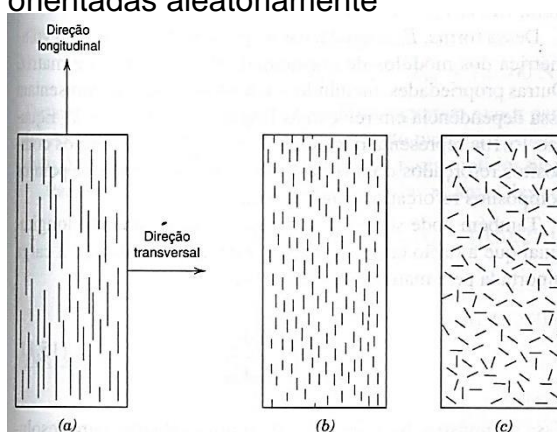
**Figura 7** - União de elementos de madeira através de varões FRP: (a) União entre dois topos; (b) União entre elementos em forma de L



Fonte: CNR (2005)

Quanto ao comprimento da fibra, elas podem ser contínuas ou descontínuas (fibras curtas: picadas ou filamentos) e em relação à orientação das fibras, estas podem ter alinhamento paralelo ao eixo longitudinal das fibras ou ter alinhamento totalmente aleatório (CALLISTER JR., 2012, p.477).

**Figura 8** - Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente



Fonte: Callister Jr. (2012, p.477)

Em aplicações que utilizam fibras contínuas orientadas paralelamente ao eixo longitudinal das fibras, a eficiência do reforço equivale a cinco vezes a eficiência do reforço em fibras descontínuas orientadas de maneira aleatória (tabela 1), porém suas características mecânicas são anisotrópicas (CALLISTER JR., 2012, p.482).

**Tabela 1** - Eficiência de reforço de compósitos reforçados com fibras para diferentes orientações das fibras e em várias direções de aplicação da tensão

<i>Orientação da Fibra</i>	<i>Direção da Tensão</i>	<i>Eficiência do Reforço</i>
Todas as fibras paralelas	Paralela às fibras	1
	Perpendicular às fibras	0
Fibras distribuídas aleatoriamente e uniformemente dentro de um plano específico	Qualquer direção no plano das fibras	$\frac{3}{8}$
	Qualquer direção	$\frac{1}{8}$

**Fonte:** H. Krenchel (1964, apud CALLISTER JR., 2012, p.483)

Segundo Callister Jr. (2012, p.480), para que se consiga o módulo de elasticidade de um compósito, composto por uma matriz polimérica com fibras contínuas orientadas paralelamente ao eixo longitudinal das fibras, submetido a um carregamento transversal (figura 8), pode ser utilizada uma expressão chamada “regra das misturas” dada por:

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m} \quad (\text{eq. 3})$$

Em que:

$E_f$  e  $E_m$  = Módulo de elasticidade para a fase reforço (fibra) e matriz, respectivamente;

$V_f$  e  $V_m$  = Volume da fase reforço (fibra) e matriz, respectivamente.

As fibras, de um modo geral, podem ser divididas em sintéticas e naturais.

As fibras naturais apesar de se encontrarem em fase de investigação, pois atualmente muitos estudos vêm sendo realizados para a aplicabilidade destas fibras em compósitos de reforços de estruturas de madeira, são abundantes, biodegradáveis e têm baixo custo, quando comparadas às fibras sintéticas, sendo assim, sua importância é indiscutível.

No entanto, as fibras sintéticas apresentam elevado desempenho mecânico e regularidade dimensional, o que as qualifica como reforço para polímeros com a finalidade de aplicações estruturais (MIOTTO; DIAS, 2006, p.172).

Recentemente, Amaya (2013) realizou investigação sobre o uso de compósitos de fibras e resina epóxi no reforço de emendas dentadas em peças de madeira. A autora elaborou alguns ensaios e, dentre eles, foi avaliada a influência das fibras de sisal e de curauá (naturais) sem tratamento nas propriedades mecânicas à tração dos compósitos com resina epóxi. Igualmente foram ensaiados à tração compósitos de fibra de vidro (sintética) e tecidos de sisal (natural).

Os resultados da influência do tipo de reforço (sisal e curauá) e da trama utilizada não afetaram de forma significativa a resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos, apresentando resultados equivalentes. Já os compósitos de fibra de vidro apresentaram valores de resistência e rigidez superiores aos compósitos reforçados com fibra de sisal (possui cerca de 44% da resistência da fibra de vidro).

Sendo assim, nesta revisão bibliográfica serão exploradas apenas as fibras sintéticas, com destaque para a fibra de vidro.

São exemplos de fibras sintéticas a fibra aramida (nome comercial Kevlar), fibra de carbono e fibra de vidro (MIOTTO; DIAS, 2006, p.166).

Vantagens, como alta resistência à tração e uma grande inércia química, fazem com que as fibras sintéticas sejam amplamente utilizadas como reforço de resinas poliméricas e, dentre todas, a mais utilizada é a fibra de vidro, que apresenta além das vantagens mencionadas, baixo custo em comparação com as fibras aramida e carbono (WAMBUA; IVENS; VERPOEST, 2003, p.1259). Fiorelli (2002) acrescenta outro benefício em se utilizar a fibra de vidro, é um produto encontrado facilmente, visto que é produzido no Brasil.

#### 2.5.4.1 Fibras de vidro

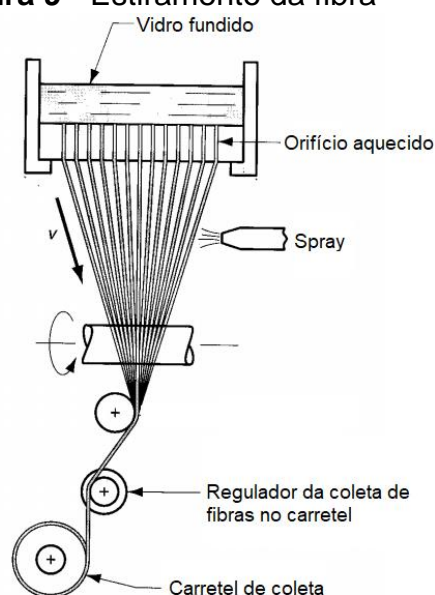
As fibras de vidro são fabricadas a partir da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), com a adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio e sua cristalização ocorre após prolongado tratamento com altas temperaturas (HULL, 1995). De acordo com esse mesmo autor, as fibras de vidro se dividem em três categorias: E (*electrical*), C (*chemical*) e S (*high tensile strength*).

Segundo Mallick (2008), as fibras de vidro do tipo E (*electrical*), que apresentam baixo custo comercial, e S (*high tensile strength*), que tem a maior resistência à tração, são as mais utilizadas como reforço.

Segundo Callister Jr. (2012, p.485), os diâmetros das fibras de vidro variam entre 3 e 20 $\mu$ m, esse material é utilizado como reforço em compósitos pelas seguintes razões:

- Material com grande disponibilidade no mercado com custo relativamente baixo;
- Quando associado a uma matriz, produz um compósito com resistência específica alta;
- É facilmente estirado na forma de fibras a partir de seu estado fundido.

**Figura 9 - Estiramento da fibra**



**Fonte:** Adaptado de processo de produção industrial  
Disponível em:  
[http://bizuando.com/material-apoio/processos-qi1/Fabrico\\_de\\_Vidro.pdf](http://bizuando.com/material-apoio/processos-qi1/Fabrico_de_Vidro.pdf)  
Acesso em: 13/09/2018

Nesta etapa de estiramento, as fibras são revestidas com uma fina camada de uma substância protetora contra danos e interações indesejáveis da fibra com o meio ambiente. Em geral, esta proteção é removida antes da fabricação do compósito e substituída por um “agente de acoplamento” que promove uma melhor aderência da fibra com a matriz polímera (CALLISTER JR., 2012, p.485).

Os agentes de acoplamento, que normalmente são considerados para reagir quimicamente com o substrato e o adesivo epóxi, são os silanos. Silanos possuem uma estrutura comum  $R-Si(OR')_3$ , em que R é o grupo que reage com o adesivo da resina líquida, e R' é geralmente um radical metila ou etila. O mecanismo de

acoplamento do silano na superfície do vidro, forma ligações covalentes (PINEDA, 2014, p.13).

Algumas fibras de vidro são comercializadas com tratamento superficial que contém silano como agente de acoplamento.

## 2.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS

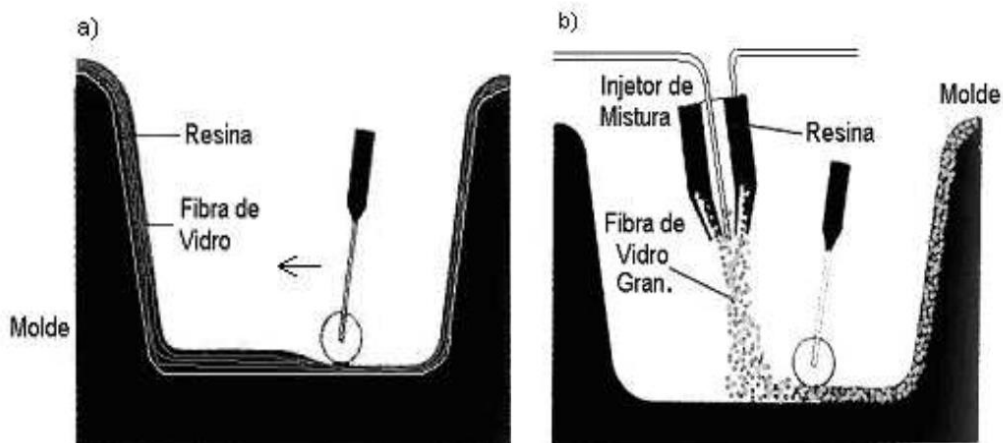
Existem diversas formas e processos de fabricar materiais compósitos poliméricos, nesta revisão bibliográfica serão abordados apenas os processos que envolvem o uso de resinas termorrígidas. Dentre os métodos de fabricação existem quatro grupos principais: Moldagem aberta, Moldagem fechada, Moldagem cilíndrica e Processos contínuos.

### 2.6.1 Moldagem Aberta

Na moldagem aberta, apenas uma das faces da peça entra em contato com o molde (ORTH; BALDIN; ZANOTELLI, 2012). São exemplos de moldagem aberta *hand lay-up* e *spray-up*.

No método *hand lay-up* ocorre a aplicação das camadas de fibra e resina sucessivamente sobre o molde, atingindo a espessura desejada, já no método *spray-up*, a mistura é aplicada sobre o molde com o uso de pistolas, utiliza-se fibra descontínua com orientação aleatória (MURPHY, 1998).

**Figura 10** - Moldagem aberta a) *hand lay-up* e b) *spray-up*



Fonte: Murphy (1998)

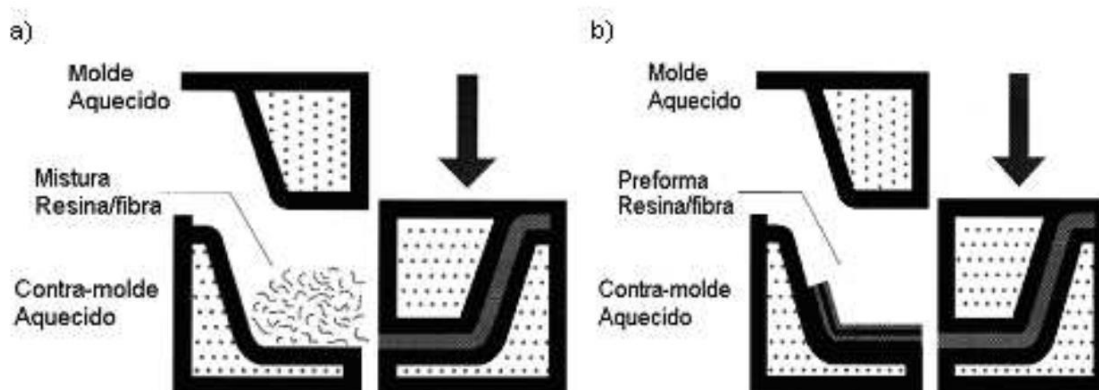
## 2.6.2 Moldagem Fechada

Os processos de moldagem fechada utilizam dois moldes (macho e fêmea). Nesse método, a aplicação da resina pode ocorrer manualmente em ambos os lados do molde, injeção da resina na fibra ou ainda injeção da mistura resina/fibra particulada em um molde fechado.

São exemplos de processos com moldes fechados *bulk molding compound* (BMC), *sheet molding compound* (SMC), *resin transfer molding* (RTM) e *vacuum – assisted transfer molding* (VARTM).

No processo BMC, a moldagem da mistura fibra/resina ocorre por compressão na forma desejada, no processo SMC a mistura resina/ fibra é realizada antes de ser colocada no molde, porém a moldagem também ocorre por compressão (KERSTING, 2004).

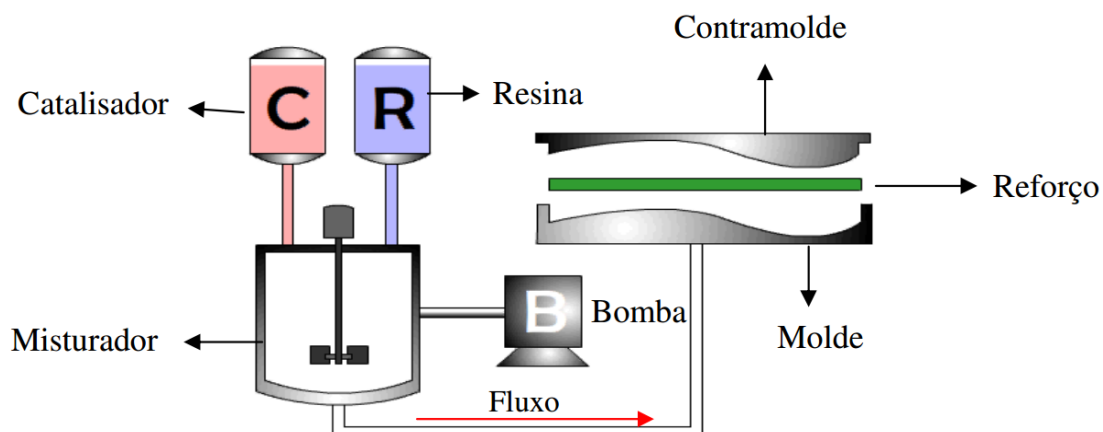
**Figura 11 - Moldagem por compressão a) BMC e b) SMC**



**Fonte:** Murphy (1998)

O processo por RTM consiste em injetar resina no molde fechado onde a fibra foi previamente colocada, posteriormente o molde é aberto para a desmoldagem do compósito (LEVY NETO, 2006).

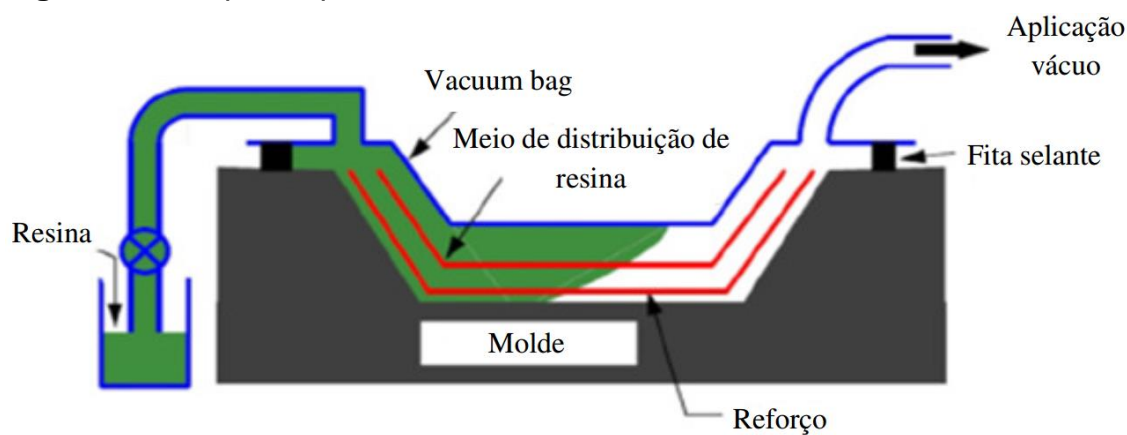
**Figura 12 - Esquema da Moldagem RTM**



Fonte: Levy Neto (2006)

O VARTM é a técnica de infusão na qual a resina é transferida através do reforço pela aplicação de pressão a vácuo, e o ar existente no reforço é expelido durante a injeção de resina (KUENTZER *et al.*, 2007).

**Figura 13 - Esquema processo VARTM**

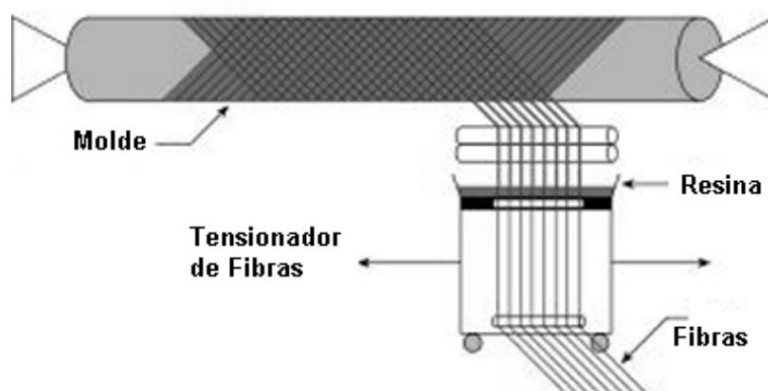


Fonte: Kuentzer *et al.* (2007)

### 2.6.3 Moldagem Cilíndrica

Os processos de molde cilíndricos envolvem um suporte cilíndrico que serve de base para a fabricação do compósito. Dentre estes se têm o método *filament winding*, cuja técnica consiste em um eixo que rotaciona de forma a proporcionar o enrolamento do reforço. A resina é impregnada conforme a fibra vai sendo enrolada.

**Figura 14 - Processo *filament winding***



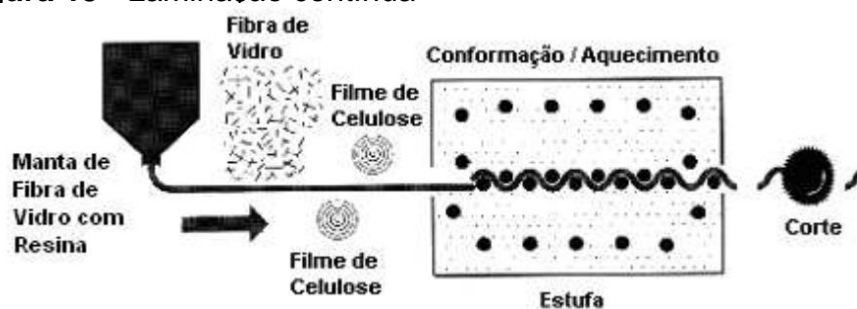
Fonte: Kuentzer *et al.* (2007)

#### 2.6.4 Processos Contínuos

Os processos contínuos são os que a peça produzida passa pela impregnação, cura e desmoldagem em uma sequência de operações consecutivas. Fazem parte deste grupo a laminação contínua, *prepegs* e pultrusão.

A laminação contínua é realizada através da pré-impregnação da manta de fibra com a resina e, a fim de melhorar a resistência mecânica, é possível adicionar reforços extras ou outros materiais. Em seguida, para regular a espessura passa-se por rolos e ao final do processo pode ser cortado em peças menores (KERSTING, 2004).

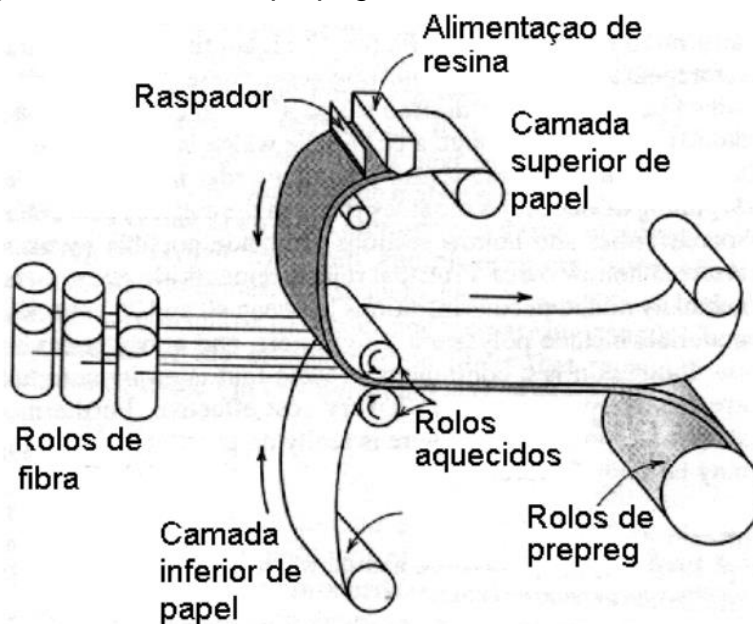
**Figura 15 - Laminação contínua**



Fonte: Murphy (1998)

A fabricação de *prepegs* envolve uma pré-forma produzida de forma contínua. O processo consiste em rolos aquecidos de fibras compactadas entre duas camadas de papel, a camada superior de papel é impregnada com resina na parte superior da máquina.

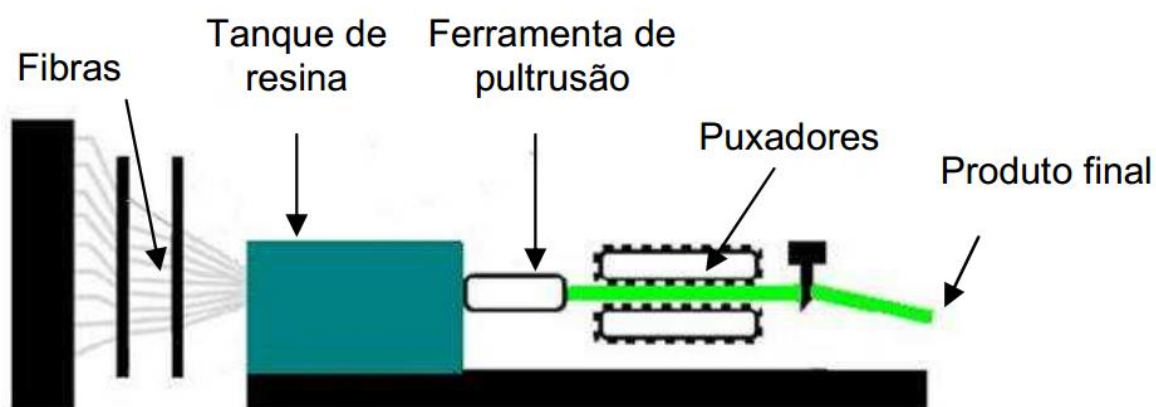
**Figura 16 - Processo prepeg**



Fonte: Kersting (2004)

A pultrusão é o processo usado para produzir perfis estruturais com seção transversal constante. O processo consiste, basicamente, na disposição de fibras contínuas (reforço), impregnadas em um banho de resina (matriz), que são puxadas continuamente através de um molde que estabelece a geometria da seção (SANTOS *et al.*, 2009 apud BARBOSA, 1996).

**Figura 17 - Esquema do Processo de Pultrusão**



Fonte: Franco (2008)

## 2.7 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com base na literatura consultada, verificou-se a viabilidade do uso da madeira *Pinus* spp. para fins estruturais. Sendo necessário realizar tanto a classificação visual quanto a mecânica para que sejam agrupadas em classes de acordo com a qualidade da madeira.

Verificou-se que as normas consultadas não fazem menção ao dimensionamento de ligações axiais por corte para compósito estrutural em peças de madeira e, como contribuição original deste trabalho, realizou-se ensaio à tração da cavilha a fim de caracterizar o material e consequentemente identificar o diâmetro a ser adotado no ensaio à tração das emendas.

Dentre os vários processos existentes para a fabricação das cavilhas verificou-se viabilidade na utilização do procedimento de pultrusão manual por ser de fácil execução, já que a quantidade de fibras na mistura é relativamente alta (63%) e a resina deve impregnar toda a fibra.

Quanto à orientação das fibras, a literatura demonstra que, as fibras contínuas e orientadas paralelamente ao eixo longitudinal das fibras, possui eficiência cinco vezes superior à eficiência de fibras descontínuas orientadas aleatoriamente.

Tanto para execução dos modelos, quanto para o arranjo da ligação da emenda do ensaio à tração das emendas foi utilizada a proposta determinada por Recco (2015), testando ligações com cavilhas de compósito estrutural pré-fabricada e curada *in situ* (em orifícios nas peças de madeira) e comparando os resultados com os obtidos por Recco para prego ardox.

A espessura das tábuas componentes dos modelos, segundo a bibliografia, varia em geral de 1,5 cm a 3,0 cm, neste trabalho foi adotada a espessura de 2 cm, por se tratar de uma dimensão comercial.

As vigas de seção laminada possuem emendas longitudinais e transversais. Nas emendas transversais foram utilizadas ligações cavilhadas de compósito estrutural pré-fabricada e curada *in situ*.

Já as emendas longitudinais ocorrem ao longo do comprimento de cada lâmina da viga de madeira e é importante garantir um espaçamento mínimo entre as emendas consecutivas de duas lâminas componentes, determinado a partir do nível de tensões aplicadas.

Para emendas longitudinais, apesar de a bibliografia demonstrar que o tipo *finger joint* (dentada) apresenta melhores resultados, foi utilizada a emenda de topo pela facilidade de execução e para comparação dos resultados com a literatura.

Quanto à configuração das peças componentes das vigas laminadas, ainda que a disposição horizontal permita uma seção mais econômica e resistente, a laminação vertical será adotada a fim de viabilizar o uso de cavilhas de menor comprimento, facilitando a execução do conjunto.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa da investigação compreende a caracterização das cavilhas de compósito estrutural através de ensaio à tração, que serão elaborados a partir de adesivo epóxi, endurecedor e fibra de vidro, utilizando o processo de fabricação por pultrusão manual, conforme esclarecido no item 2.7 deste trabalho.

A segunda etapa da investigação compreende os ensaios à tração das emendas, utilizando cavilhada de compósito estrutural com diâmetro calculado (apêndice D) a partir dos dados fornecidos pelo ensaio à tração.

Dois tipos de ligações foram ensaiados, as cavilhas pré-fabricadas de compósito estrutural e as cavilhas de compósito estrutural curadas *in situ*.

#### 3.1 EXECUÇÃO E ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIIS

De acordo com a norma americana ASTM D 638-08, a quantidade mínima de corpos de prova para realizar ensaio à tração em materiais anisotrópicos é de dez amostras, sendo cinco normais e cinco paralelos às fibras ou com o eixo principal da anisotropia. Portanto, nos ensaios foram utilizadas cinco amostras, medindo-se as deformações longitudinal e transversal de cada uma delas.

Esta quantidade mínima foi adotada, pois a determinação das deformações longitudinal e transversal utilizando-se *strain gages* envolve tanto o recurso para sua aquisição como também a técnica de manipulação e colagem dos extensômetros aos corpos de prova e um sistema de aquisição de dados.

Medindo-se as deformações através de *strain gages* nas duas direções dos corpos de prova foram obtidas todas as propriedades de interesse, ou seja, a tensão de ruptura, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, e viabilizou-se o cálculo do diâmetro das cavilhas de compósito estrutural a ser utilizado na etapa seguinte da investigação.

##### 3.1.1 Materiais Compósitos Poliméricos

A seguir serão apresentados os materiais empregados para a fabricação dos corpos de prova desta primeira fase do trabalho.

Cada cavilha de compósito estrutural é composta pela fase reforço e a fase matriz, preenchida pelo adesivo epóxi Araldite Ly 1564BR com endurecedor compatível do revendedor autorizado HUNTSMAN, comercializado pela empresa Maxepoxi sul.

O endurecedor utilizado foi o Aradur 2963, do mesmo revendedor e fornecedor. À fase reforço, preencheu-se pela fibra de vidro Advantex E-CR GLASS, da marca Owens Corning.

**Figura 18** - Materiais utilizados na mistura do compósito estrutural: Aradur 2963, Araldite Ly 1564BR e fibra de vidro Advantex E-CR GLASS



Fonte: a própria autora

### 3.1.2 Determinação do projeto das Amostras

Inicialmente serão expostas tentativas de fabricação dos corpos de prova que não obtiveram êxito. Pois, por se tratar de uma contribuição inédita, com ensaio à tração de cavilhas elaboradas a partir de compósito estrutural, necessitou-se de um estudo exploratório a respeito da maneira como os corpos de prova seriam fabricados.

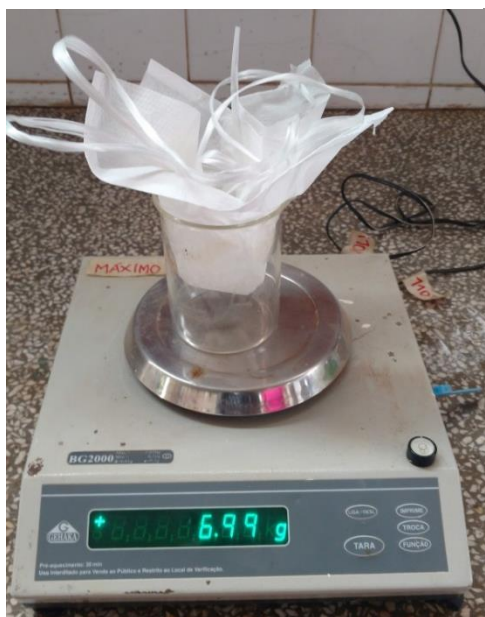
Para tanto, para a fabricação dos corpos de prova de compósito estrutural, foi determinado o tamanho amostral com base na estimativa da proporção populacional (apêndice A), que demonstrou que usando-se 15% da população, com intervalo de confiança de 95% e erro amostral de 10%, tem-se uma amostra de cinco corpos de prova selecionados de uma população de trinta e três unidades.

A princípio foi realizado o cálculo para determinar o peso de cada material que compõe a cavilha de compósito estrutural (apêndice B - A). A cavilha com dimensões de 150 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro possui volume de 4,239 cm<sup>3</sup>, e é composta por 1,20g de Araldite Ly 1564BR, 0,52g de Aradur 2963 e 6,99g de fibra de vidro.

Essa dimensão da cavilha para a realização do ensaio à tração foi determinada a fim de ser compatível com o equipamento a ser utilizado e também pelo molde da cavilha que consiste em canudo plástico da marca Straw plast.

Inicialmente a fibra de vidro Advantex E-CR GLASS foi cortada e pesada na balança de precisão, com 6,99 g para cada um dos trinta e três corpos de prova.

**Figura 19** - Pesagem da Fibra de vidro Advantex E-CR GLASS



Fonte: a própria autora

Nesta mesma balança, pesaram-se os instrumentos utilizados para a confecção das cavilhas de compósito estrutural, sendo o prato plástico com 5,85g usado para impregnar a resina na fibra e o canudo plástico com 0,66g empregado como fôrma ou molde da cavilha.

Os canudos utilizados possuem comprimento de 150 mm e diâmetro interno de 6 mm, medido com paquímetro digital Caliper (0-150mm).

**Figura 20 - Canudo straw plast**



**Fonte:** Canudo mexedor preto  
Disponível em:  
<http://strawplast.com.br/produtos/canudo-mexedor/> Acesso em: 21/08/2018

Após a medição das dimensões dos materiais, iniciou-se a fabricação dos corpos de prova. O procedimento adotado para a execução das cavilhas foi o de pultrusão manual, após tentativas que não foram bem-sucedidas nas quais, em primeiro lugar, era inserida a fibra de vidro no canudo e depois a resina através de injeção e infusão (injeção a vácuo), explicados no item 2.7.2.

Na primeira tentativa, a resina foi colocada através de seringa (20ml luer slip sem agulha da marca SR) por injeção e sucção no molde com a fibra de vidro já inserida. Na segunda tentativa, foi utilizada uma seringa maior (60ml cateter sem agulha da marca SR) para realizar a infusão da resina e um tubo de látex 204 da marca Lemgruber para proporcionar o vácuo entre a seringa e o canudo com fibra. Em ambos os casos, houve regiões do corpo de prova que não foram impregnadas com a resina, conforme figura 21.

**Figura 21 - Acima corpo de prova por injeção e sucção e abaixo por infusão**



**Fonte:** a própria autora

A terceira tentativa, por pultrusão, iniciou-se com o adesivo epóxi Araldite Ly 1564BR e o endurecedor Aradur 2963 sendo misturados conforme proporção da mistura em volume dado na ficha técnica da resina (anexo A). Para evitar desperdício com o endurecimento da resina caso a mistura fosse feita em grandes quantidades, tanto o epóxi quanto o endurecedor foram misturados gradativamente, à medida que os corpos de prova iam sendo fabricados.

Para cada 5 ml do epóxi foram acrescentados 2,5 ml do endurecedor. Essas quantidades foram retiradas dos fracos dos materiais por meio de seringa (20ml luer slip sem agulha da marca SR), colocadas no prato plástico e misturadas com palito de madeira, conforme figura 22.

**Figura 22** - Preparação da mistura: Inserção da resina epóxi Araldite Ly 1564BR, do endurecedor Aradur 2963 e mistura sendo realizada com palito de madeira



**Fonte:** a própria autora

Em seguida, as fibras de reforço foram impregnadas por banho de resina (realizada em prato plástico). As fibras impregnadas foram puxadas com o auxílio de um fio metálico pela cavidade interna do canudo, como ilustrado na figura 23.

**Figura 23** - Banho das fibras na resina e fio metálico utilizado para passá-las no canudo



Fonte: a própria autora

Posteriormente, os corpos de prova passaram por um procedimento de limpeza no qual o excesso de resina que ficava por fora do canudo plástico era retirado com papel toalha. Cada corpo de prova foi pesado em balança de precisão, com a tara de 5,85g equivalente ao peso do prato plástico.

**Figura 24** - Pesagem dos corpos de prova



Fonte: a própria autora

Os dados coletados podem ser verificados na tabela 2, que apresenta o peso final de cada corpo de prova, descontando-se o peso do molde.

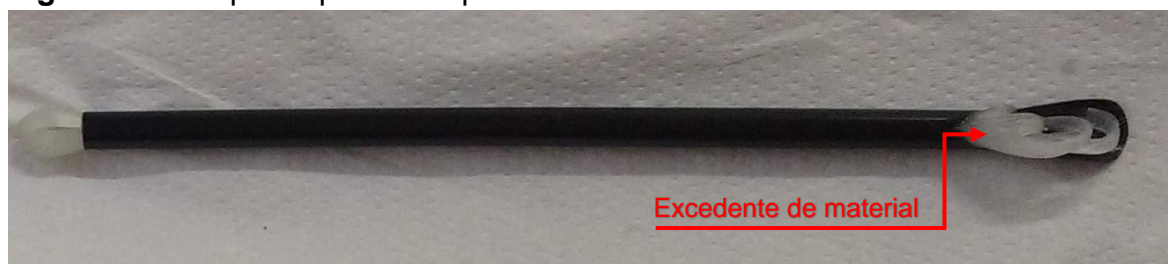
**Tabela 2 - Massa dos Corpos de prova**

Tabela com Massas dos corpos de prova Compósitos Estruturais							
Corpo de Prova	Massa balança (g)	Massa Canudo (g)	Massa Final (g)	Corpo de Prova	Massa balança (g)	Massa Canudo (g)	Massa Final (g)
CE1	10,80	0,66	10,14	CE18	11,15	0,66	10,49
CE2	10,20	0,66	9,54	CE19	11,17	0,66	10,51
CE3	10,86	0,66	10,20	CE20	11,01	0,66	10,35
CE4	11,11	0,66	10,45	CE21	11,06	0,66	10,4
CE5	10,62	0,66	9,96	CE22	11,01	0,66	10,35
CE6	10,97	0,66	10,31	CE23	11,15	0,66	10,49
CE7	10,86	0,66	10,20	CE24	11,02	0,66	10,36
CE8	10,88	0,66	10,22	CE25	10,99	0,66	10,33
CE9	10,97	0,66	10,31	CE26	11,11	0,66	10,45
CE10	10,86	0,66	10,20	CE27	10,72	0,66	10,06
CE11	10,96	0,66	10,30	CE28	10,70	0,66	10,04
CE12	11,20	0,66	10,54	CE29	10,64	0,66	9,98
CE13	10,94	0,66	10,28	CE30	10,87	0,66	10,21
CE14	10,99	0,66	10,33	CE31	10,60	0,66	9,94
CE15	10,95	0,66	10,29	CE32	10,97	0,66	10,31
CE16	10,98	0,66	10,32	CE33	10,81	0,66	10,15
CE17	10,97	0,66	10,31				

Fonte: a própria autora

É possível observar que os corpos de prova possuem massa superior ao encontrado nos cálculos (8,72g). Isto ocorre, pois, no cálculo, foram consideradas as seguintes dimensões para os corpos de prova: 150 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro, porém a fabricação ocorreu deixando excedente de material nas extremidades, que foram cortadas.

**Figura 25 - Corpo de prova em processo de cura**



Fonte: a própria autora

Por fim, a cura das cavilhas ocorreu à temperatura ambiente e foram desenhadas após 18 horas decorridas de sua fabricação.

**Figura 26** - Trinta e três corpos de prova produzidos



**Fonte:** a própria autora

Após a execução das trinta e três amostras, foram selecionados, por amostragem aleatória simples sem reposição, cinco corpos de prova para realizar o ensaio à tração, por meio do programa BioEstat (versão 5.0).

Os corpos de prova aleatórios obtidos na seleção para o ensaio à tração foram os de número: 10, 13, 20, 26, 29.

**Figura 27** - Corpos de prova desmoldados: à esquerda os selecionados para o ensaio à tração e à direita demais corpos de prova



**Fonte:** a própria autora

O equipamento utilizado para o ensaio foi a máquina universal da marca EMIC, modelo DL 30000, que funciona com duas estruturas de reação, a primeira com capacidade máxima de 300 kN e a segunda com capacidade máxima de 20 kN.

Ao se posicionar os corpos de prova na máquina, observou-se que o ensaio na primeira estrutura de reação não seria possível ser realizado devido à geometria das garras. Na segunda estrutura de reação, com capacidade máxima de 20 kN, ocorria esmagamento das extremidades (área que ficava na garra do equipamento),

interrompendo o ensaio, antes mesmo que houvesse a ruptura do corpo de prova em sua região central, devido a pré-força aplicada na garra.

Sendo assim, optou-se por engrossar as extremidades dos corpos de prova já fabricados para evitar a perda do material. O engrossamento foi realizado com o próprio epóxi por se tratar de um polímero monolítico, que, após a cura, possui a capacidade de se tornar um componente único quando misturado com resina líquida.

Dois modelos foram engrossados e torneados, o primeiro usinado em formato cilíndrico e o segundo fresado.

**Figura 28** - Corpo de prova com extremidades engrossadas



Fonte: a própria autora

Ao realizar o ensaio com estes modelos observou-se o escorregamento dos corpos de prova nas garras.

Como a princípio levantou-se como possível causa para o não rompimento destes corpos de prova a inadequada capacidade máxima do equipamento (20kN), optou-se por diminuir a seção transversal do corpo de prova de 6 mm para 4 mm.

Assim, foram fabricados dois novos corpos de prova com diâmetro de 4 mm e 150 mm de comprimento, utilizando-se como molde “vareta suporte para bexigas”, fornecido por P. OKUNO IMPORT LTDA-ME.

Nesse ensaio também houve esmagamento das extremidades e a ruptura não ocorreu no centro do corpo de prova. Observou-se, portanto, que além da redução da seção transversal do corpo de prova, o formato também necessitaria de ajuste.

**Figura 29** - Ensaio corpo de prova  
Ø 4 mm



**Fonte:** a própria autora

Após essas tentativas que não foram bem-sucedidas e a verificação que os primeiros corpos de prova não seriam aproveitados, decidiu-se fabricar novos corpos de prova com outro formato, extremidades com diâmetro superior ao diâmetro central.

Foram fabricados cinco corpos de prova, todos com diâmetro de 6 mm nas extremidades e diâmetros centrais diferentes. Sendo dois com 4 mm de diâmetro central, dois com 3,6 mm e o último com 3,2 mm. Os moldes utilizados nas extremidades foram canudos da marca Straw plast, o molde com diâmetro interno de 4 mm utilizado foi a “vareta suporte para bexigas” e os moldes para os diâmetros de 3,6 mm e 3,2 mm foram palitos de pirulitos, da marca BWB. Durante a fabricação destes corpos de prova, observou-se dificuldade em passar as fibras nos corpos de prova com diâmetros de 3,2 mm e 3,6 mm, o que acarretou diminuição da porcentagem de fibra na mistura.

**Figura 30** - Corpos de prova com diferentes diâmetros centrais



Ø centro = 4 mm Ø centro = 4 mm Ø centro = 3,6 mm Ø centro = 3,6 mm Ø centro = 3,2 mm

**Fonte:** a própria autora

Ensaíram-se diferentes diâmetros, pois havia dúvida se a capacidade máxima do equipamento de 20kN seria suficiente para romper o corpo de prova com 4 mm de diâmetro central. Esse ensaio foi de grande importância, porque houve o rompimento no centro dos corpos de prova. O corpo de prova de diâmetro central de 4 mm foi escolhido, já que obteve melhor desempenho devido à porcentagem de fibra na mistura estar dentro do padrão estipulado de 63%, segundo ficha técnica da fibra de vidro (anexo B).

Foram fabricadas dez amostras com diâmetro central de 4 mm para ensaiar, a fim de verificar a relação entre a classificação visual dos corpos de prova e a tensão de ruptura, ou seja, se os corpos de prova isentos de defeitos teriam uma tensão de ruptura maior em relação aos outros.

A Classificação Visual realizada levantou os seguintes defeitos:

- Bolhas provocadas pela entrada de ar durante a fabricação dos corpos de prova;
- Fibras embaraçadas, devido a erro no puxamento das fibras com o fio metálico por dentro do molde.

**Figura 31** - Fabricação dos corpos de Prova e Corpos de prova desenformados

Fonte: a própria autora

Ao realizar o ensaio, observou-se que as amostras com menos defeitos, apresentavam uma tensão de ruptura superior.

Sendo assim, o procedimento para seleção dos corpos de prova do ensaio à tração foi a classificação visual, diferente do primeiro lote de amostras, quando se realizou o cálculo do tamanho amostral (apêndice A).

A seguir, é apresentada tabela com os dados coletados neste ensaio em que se observa que as amostras 02, 05, 06, 07 com defeitos apresentaram desempenho 55% inferior às demais.

**Tabela 3** - Ensaio à tração das cavilhas

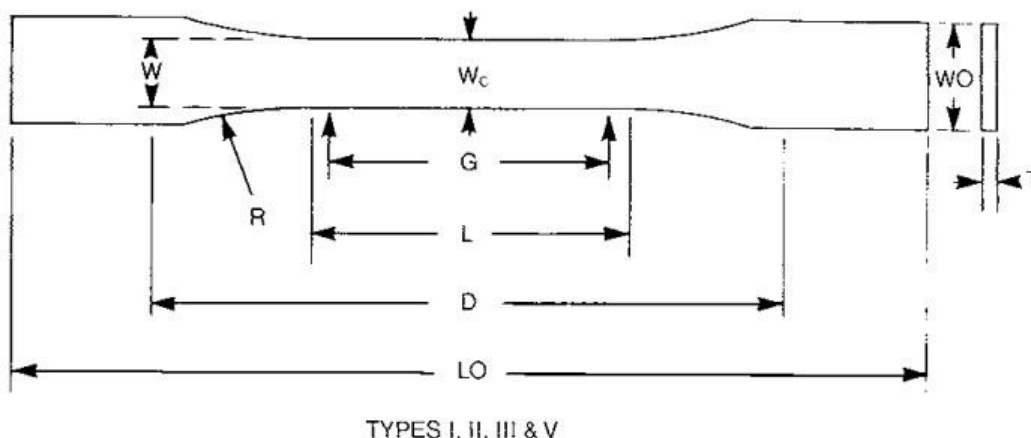
Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Força @Força Max. (kN)	Força @Ruptura (kN)	Tensão @Ruptura (MPa)	Tensão @Força Max. (MPa)	Deformação @Força Max. (mm)
1	4	6.03	5.60	445.33	479.71	8
10	4	5.65	5.24	417.20	449.24	8
8	4	7.83	7.01	557.83	623.46	8
9	4	6.83	6.48	515.65	543.77	8
→ 2	4	5.28	4.38	348.45	420.33	5
→ 6	4	5.50	4.43	352.36	437.52	8
4	4	6.85	6.41	510.18	545.33	8
3	4	6.87	6.29	500.80	546.90	10
→ 7	4	5.26	3.45	274.23	418.77	7
→ 5	4	4.93	4.16	290.69	344.17	9
Número CPs	10	10	10	10	10	10
Média	4.027	6.104	5.345	421.3	480.9	8.024
Mediana	4.000	5.837	5.419	431.3	464.5	8.139
Desv. Padrão	0.08538	0.9444	1.199	100.6	82.93	1.210
Coef. Var. (%)	2.120	15.47	22.44	23.88	17.24	15.08
Mínimo	4.000	4.929	3.446	274.2	344.2	5.416
Máximo	4.270	7.835	7.010	557.8	623.5	9.828

Fonte: a própria autora

Em seguida, foram fabricadas dezoito amostras com este formato, sendo nove amostras do tipo A com comprimento total de 165 mm e nove amostras do tipo B com comprimento total de 195 mm.

Para a definição do projeto das amostras, tomou-se por base o tipo I de corpo de prova (para materiais com espessura menores ou iguais a 7 mm) da norma americana ASTM D638-08 (2008).

**Figura 32** - Dimensões do corpo de prova ASTM D 638-08 (2008) tipo I



Specimen Dimensions for Thickness, $T$ , mm	
Dimensions (see drawings)	7 or under Type I
$W$ —Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13
$L$ —Length of narrow section	57
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	19
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	...
$LO$ —Length overall, min <sup>H</sup>	165
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	50
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	...
$D$ —Distance between grips	115
$R$ —Radius of fillet	76
$RO$ —Outer radius (Type IV)	...

Fonte: ASTM D638-08

Levando-se em consideração que se almejava um corpo de prova cilíndrico e tendo conhecimento do equipamento que seria usado para realizar o ensaio, decidiu-se adaptar algumas das dimensões indicadas pela norma.

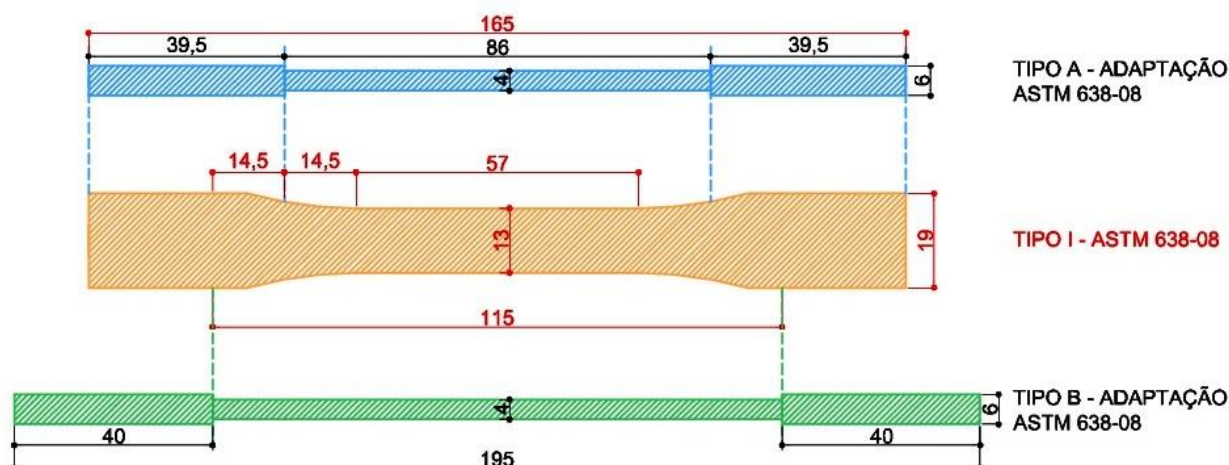
Para tanto, ficou definido que os corpos de prova teriam diâmetro central “ $W_c$ ” de 4 mm e nas extremidades “ $WO$ ” de 6 mm. Além de essas dimensões serem compatíveis com o equipamento, elas também foram definidas pelos moldes da cavilha, canudo ( $\varnothing$  6 mm) e “vareta suporte para bexigas” ( $\varnothing$  4 mm). Outra

adaptação realizada foi o comprimento das extremidades da peça: a norma recomenda 25 mm  $((LO-D)/2)$ , porém, devido ao comprimento da garra da máquina, adotou-se 40 mm.

Por fim, por se tratar de um corpo de prova cilíndrico e fabricado manualmente, a transição do diâmetro menor para o maior em forma curva não foi realizada, pois seria necessária a usinagem da peça por torneamento o que poderia acarretar quebra das fibras de vidro que compõem o compósito. Poderia também causar vibração nas fibras, comprometendo a estrutura do corpo de prova.

A imagem 33 demonstra os dois tipos de corpos de prova produzidos, bem como as adaptações efetuadas das dimensões da norma.

**Figura 33** - Projeto do corpo de prova de tração com base na norma ASTM D 638-08 (2008) tipo I



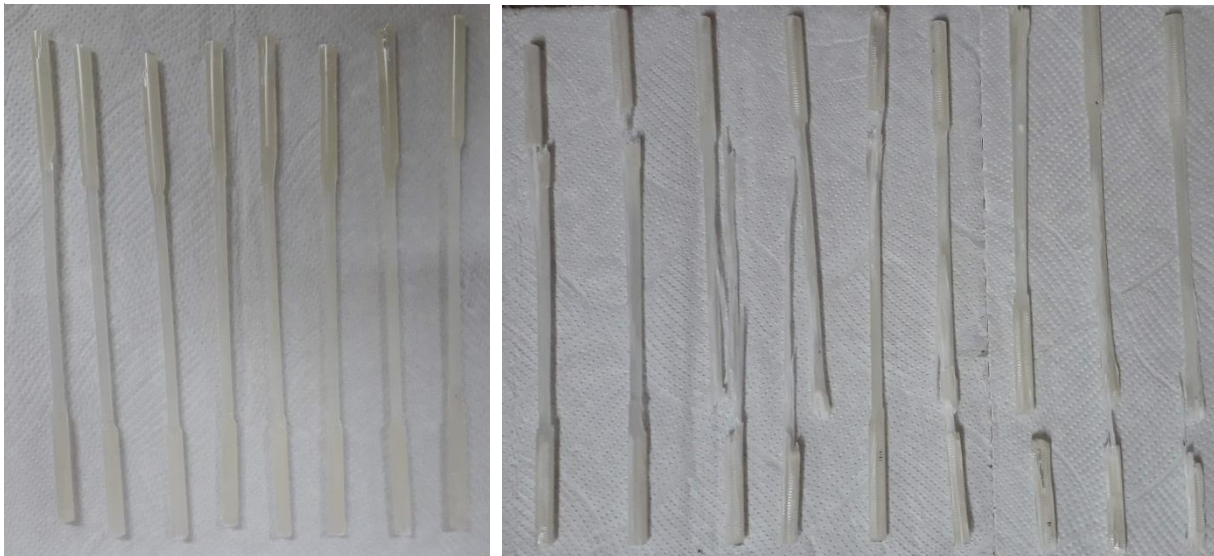
Fonte: a própria autora

Os benefícios dessas adaptações do modelo fornecido pela norma ASTM D638-08 (2008) no projeto do corpo de prova foram:

- Menor tempo empregado e menor quantidade de material perdido por uma possível usinagem, e por consequência evita-se dano a estrutura interna do corpo de prova pela transferência de calor do atrito da usinagem;
- Reprodução das dimensões dos corpos de prova em toda a série de amostras com maior precisão.

As figuras 34 e 35 mostram os corpos de prova do tipo A e do tipo B, respectivamente, desenformados à esquerda e seu modo de ruptura à direita.

**Figura 34** - Corpos de prova tipo A



**Fonte:** a própria autora

**Figura 35** - Corpos de prova tipo B



**Fonte:** a própria autora

O resultado da média das forças de ruptura e da média da tensão de ruptura apresentou para as cavilhas do tipo B desempenho 2,93% e 2,60% superiores aos do tipo A, respectivamente, de acordo com a tabela 4.

**Tabela 4 - Ensaio à tração cavilhas Tipo A e Tipo B**

Corpo de Prova	cp	Diâmetro (mm)	Força @Força Max. (kN)	Força @Ruptura (kN)	Tensão @Ruptura (MPa)	Tensão @Força Max. (MPa)	Deformação @Força Max. (mm)
TIPO A	7	4.00	7.35	7.27	578.15	585.18	9
TIPO A	5	4.11	6.88	6.84	515.79	518.75	9
TIPO A	10	4.22	7.40	7.18	513.12	529.27	8
TIPO A	11	4.19	7.81	7.52	545.42	566.07	9
TIPO A	9	4.21	6.62	5.69	409.06	475.36	9
TIPO A	4	4.22	7.67	7.17	512.42	548.22	9
TIPO A	1	4.17	8.10	7.66	560.72	593.07	10
TIPO A	3	4.16	7.90	7.64	561.98	581.48	9
TIPO A	2	4.36	8.09	7.78	520.81	541.85	9
Número CPs	0	9	9	9	9	9	9
Média	*	4.182	7.536	7.193	524.2	548.8	9.034
Mediana	*	4.190	7.668	7.265	520.8	548.2	9.045
Desv.Padrão	*	0.09641	0.5210	0.6360	49.65	37.71	0.3999
Coef.Var.(%)	*	2.305	6.914	8.841	9.472	6.871	4.427
Mínimo	*	4.000	6.617	5.694	409.1	475.4	8.367
Máximo	*	4.360	8.100	7.776	578.1	593.1	9.625
Corpo de Prova	cp	Diâmetro (mm)	Força @Força Max. (kN)	Força @Ruptura (kN)	Tensão @Ruptura (MPa)	Tensão @Força Max. (MPa)	Deformação @Força Max. (mm)
TIPO B	6	4.05	6.71	6.19	480.13	520.52	9.52
TIPO B	12	4.15	6.96	6.78	501.54	514.61	10.59
TIPO B	13	4.20	8.14	7.58	547.07	587.47	10.11
TIPO B	8	4.22	7.72	7.14	510.31	551.73	10.31
TIPO B	16	4.25	7.61	7.20	507.29	536.35	9.66
TIPO B	15	4.22	8.46	8.02	573.49	605.08	10.13
TIPO B	18	4.07	8.13	7.91	608.24	624.84	9.87
TIPO B	14	4.26	8.84	8.50	596.52	619.94	9.51
TIPO B	17	4.25	8.35	7.31	515.59	588.26	8.88
Número CPs	0	9	9	9	9	9	9
Média	*	4.186	7.878	7.404	537.8	572.1	9.843
Mediana	*	4.220	8.129	7.314	515.6	587.5	9.872
Desv.Padrão	*	0.07860	0.7003	0.6954	45.54	42.30	0.5131
Coef.Var.(%)	*	1.878	8.889	9.393	8.467	7.394	5.213
Mínimo	*	4.050	6.706	6.185	480.1	514.6	8.879

**Fonte:** a própria autora

A geometria escolhida para realização do ensaio à tração das cavilhas com os *strain gages* foi do tipo B, devido aos melhores resultados observados neste ensaio.

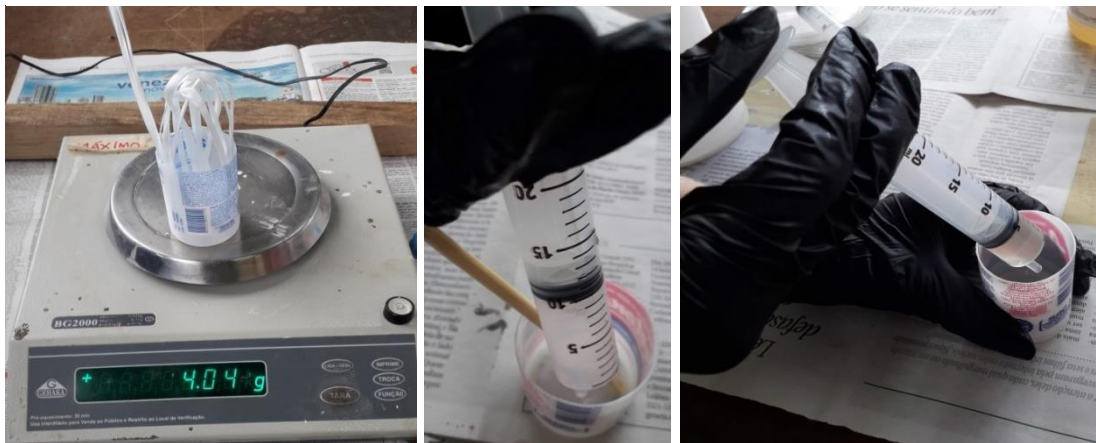
### 3.1.3 Fabricação das Amostras com *strain gages*

A confecção dos corpos de prova foi realizada no laboratório de maquetes e o ensaio à tração dos corpos de prova foi efetuado no laboratório de materiais da UEL (Universidade Estadual de Londrina).

Seguiu-se o mesmo procedimento de fabricação explicado no item 3.1.2, cálculo para determinar o peso de cada material (apêndice B - B), pesagem da fibra, mistura da resina e do endurecedor, conforme proporção da mistura (anexo A).

Para cavilha com dimensões de 19,5 mm de comprimento, 6 mm de diâmetro nas extremidades e 4mm de diâmetro central, o volume total de 3,705 cm<sup>3</sup>, é composto por 1,65g de Araldite Ly 1564BR, 0,72g de Aradur 2963 e 4,04g de fibra de vidro.

**Figura 36** - Pesagem da Fibra de vidro Advantex E-CR GLASS e preparação da mistura



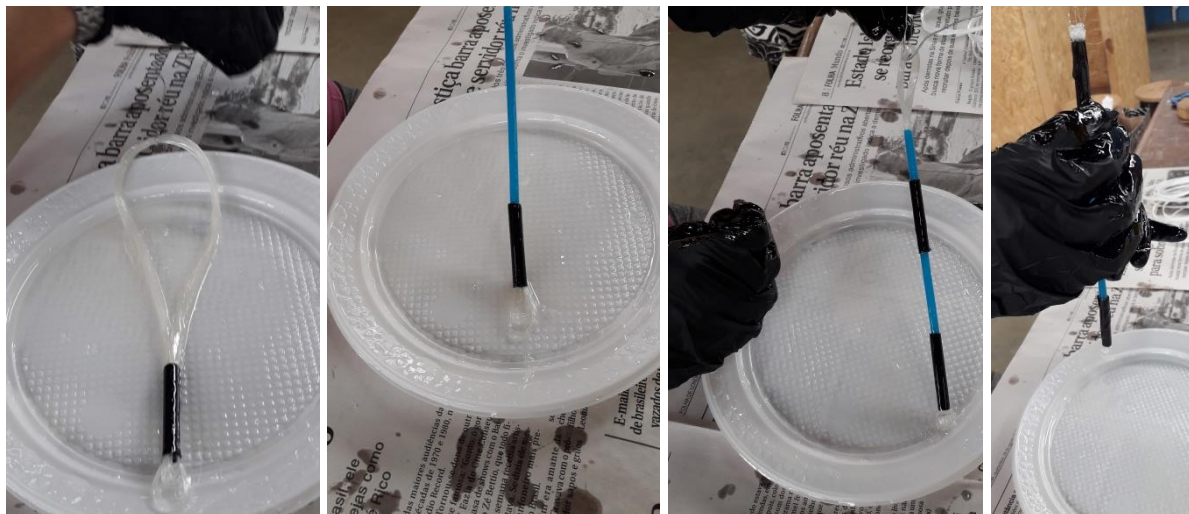
Fonte: a própria autora

O processo de pultrusão manual se iniciou com as fibras de reforço banhadas em resina (realizada no prato plástico).

As fibras impregnadas foram puxadas com o auxílio de um fio metálico por dentro do canudo plástico preto com 40 mm de comprimento. Em seguida, passou-se a vareta suporte para bexigas azul com 115 mm e, posteriormente, mais um canudo preto de 40 mm, que ficava sobreposto ao molde azul, de diâmetro menor.

Por último, a extremidade foi mais uma vez impregnada na resina e o canudo preto voltou a sua posição.

**Figura 37** - Banho das fibras na resina e fio metálico utilizado para moldagem da cavilha



Fonte: a própria autora

Posteriormente, cada corpo de prova era pesado em balança de precisão, com a tara de 5,85g equivalente ao peso do prato plástico.

Foram coletadas as massas dos onze corpos de prova após serem desenformados e também após o corte do excedente de material das extremidades (massa final). Também foram coletadas as dimensões dos corpos de prova com paquímetro digital Caliper (0-150 mm).

**Tabela 5** - Massa e dimensões dos Corpos de prova

Tabela com massa e dimensões dos corpos de prova Compositos Estruturais										
Corpo de Prova	Massa com molde (g)	Massa Desenformado (g)	Massa Final (g)	Comp. total (LO) (mm)	Ø Centro (Wc) (mm)	Comp. centro (D) (mm)	Ø extremidade 1 (Wc1) (mm)	Comp. extremidade 1 (mm)	Ø extremidade 2 (Wc1) (mm)	Comp. extremidade 2 (mm)
CP1	7,77	6,66	5,64	181,73	4,28	115,04	5,58	25,82	5,98	40,65
CP2	7,35	6,41	5,51	182,79	3,94	120,96	5,91	29,63	6,15	31,32
CP3	7,66	6,59	5,54	180,14	4,31	116,41	6,11	27,67	6,27	35,50
CP4	7,29	6,35	5,87	191,73	4,17	116,34	6,29	36,46	6,06	40,69
CP5	7,86	6,65	6,24	196,51	4,23	114,53	6,39	41,34	6,22	40,63
CP6	7,94	6,76	6,36	196,03	4,22	116,02	6,48	40,35	6,36	40,17
CP7	7,79	6,69	6,03	195,15	4,16	114,92	5,84	40,07	5,47	39,81
CP8	8,23	6,94	6,08	193,62	4,23	113,95	6,23	39,69	6,16	38,89
CP9	8,21	7,12	6,09	192,24	4,22	115,41	6,14	38,27	6,02	38,28
CP10	7,91	6,86	6,14	190,82	4,25	110,78	6,32	40,24	6,04	41,18
CP11	8,34	6,68	5,32	171,38	4,24	114,42	6,26	20,29	6,53	37,32

Fonte: a própria autora

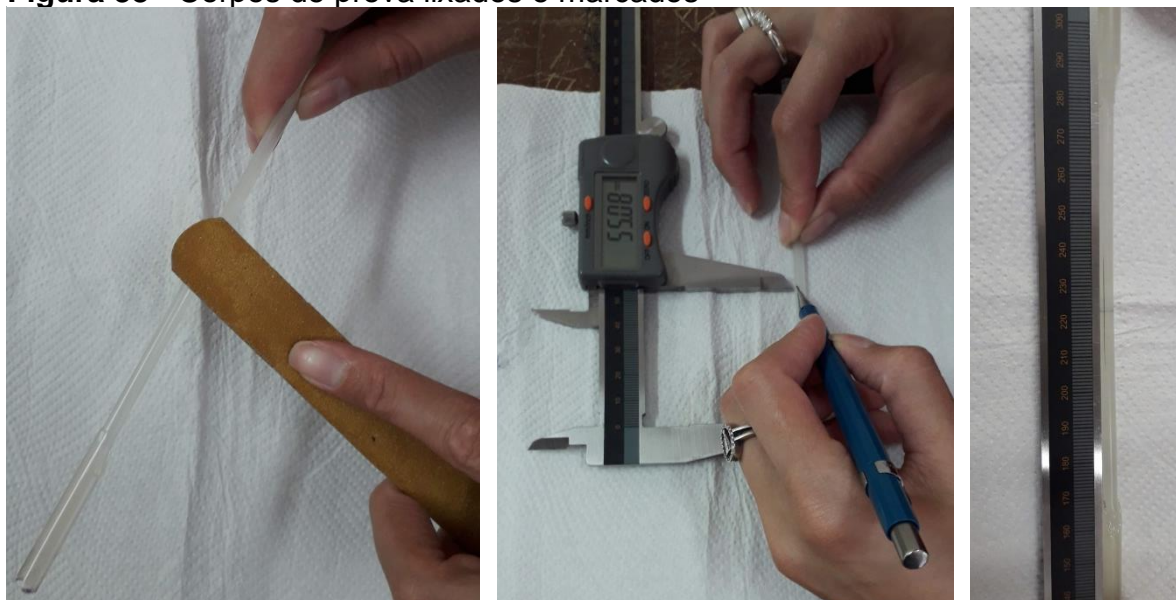
A cura das cavilhas ocorreu à temperatura ambiente e foram desenformados após 24 horas decorridas de sua fabricação.

### 3.1.4 Preparação dos Corpos de Prova para Ensaio à Tração

Após a execução das onze amostras, foram selecionados através de classificação visual seis corpos de prova (CP5, CP6, CP7, CP8, CP9, CP10), para realizar o ensaio à tração das cavilhas, medindo-se as deformações transversais e longitudinais com o auxílio de *strain gages* KFG-5-120-C1-11, da marca Kyowa.

Para tanto, cada corpo de prova foi levemente lixado para que os *strain gages* aderissem mais facilmente. Com a finalidade de que eles ficassem centralizados nos corpos de prova, foram realizadas marcações.

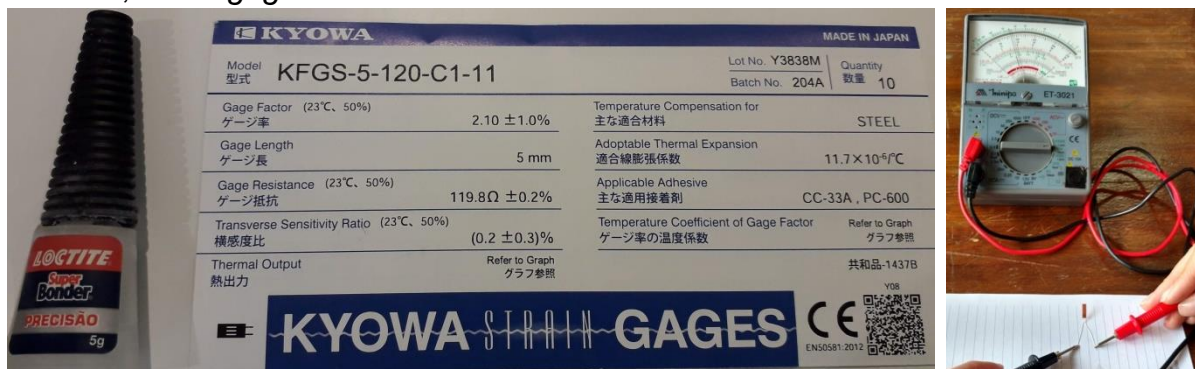
**Figura 38** - Corpos de prova lixados e marcados



**Fonte:** a própria autora

Antes de serem colados, os *strain gages* foram testados com multímetro ET-3021 da marca Minipa, para detectar possíveis defeitos, o que não ocorreu. O adesivo de precisão utilizado para colagem dos *strain gages* foi o Super bonder, da marca Loctite. Esse adesivo é à base de cianoacrilato e tem como principal característica ser anaeróbico, ou seja, de curar na ausência de ar. Assim, endurece em pouco tempo, de 10 a 30 s e deve ser aplicado com uma pressão uniforme sobre toda a área do *strain gage*.

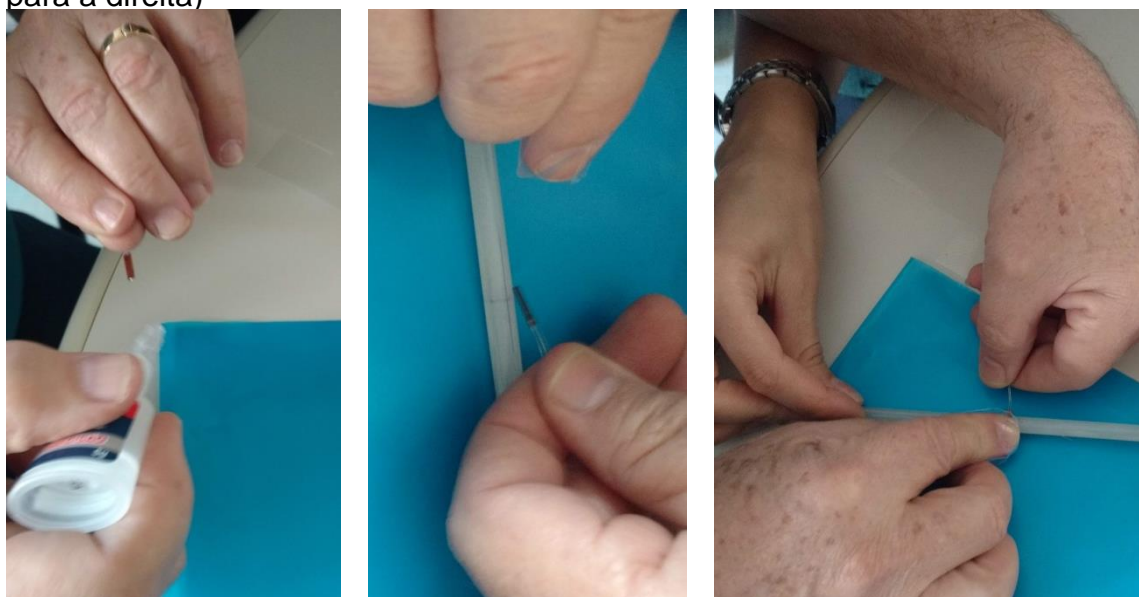
**Figura 39** - À esquerda, materiais utilizados: *strain gages* Kyowa e super bonder e à direita; *strain gages* submetidos ao multímetro



Fonte: a própria autora

Após aplicar o adesivo nos *strain gages*, estes foram posicionados centralizados nas marcações dos corpos de prova e pressionados suavemente.

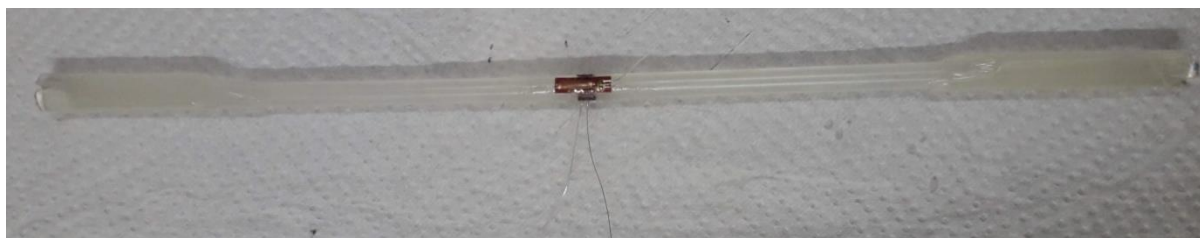
**Figura 40** - Colagem dos *strain gages*: Super bonder aplicado no extensômetro, colagem deste no corpo de prova e plástico auxiliando colagem (da esquerda para a direita)



Fonte: a própria autora

Após a colagem, os *strain gages* foram novamente testados com multímetro que comprovou a resistência de 120 ohms, de acordo com a ficha técnica da embalagem.

**Figura 41** - Corpo de prova após colagem dos *strain gages*



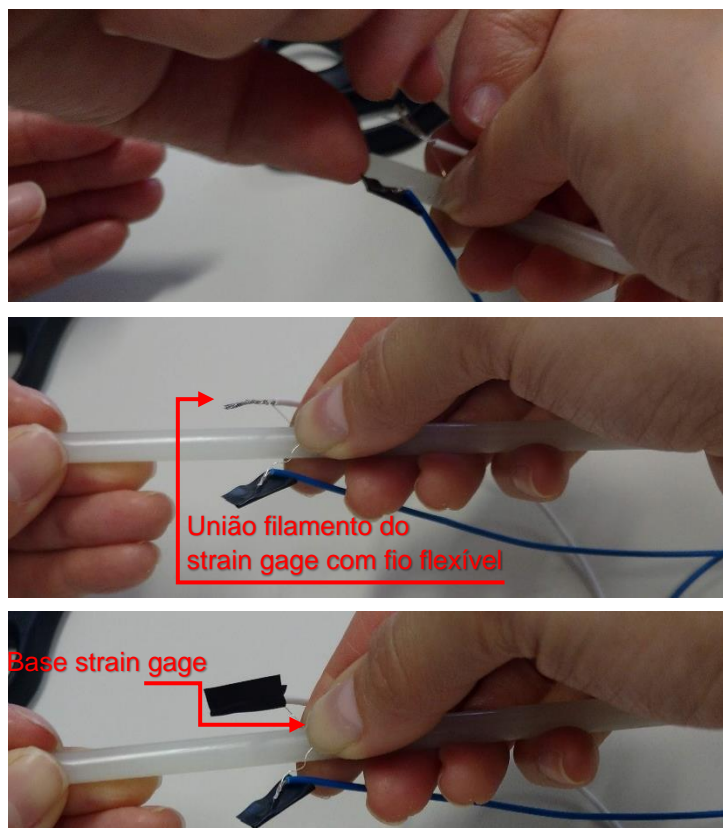
Fonte: a própria autora

Em seguida, foi realizada a união da fiação nos *strain gages* através de fios flexíveis. Estes foram retirados de cabos, que reuniam dois fios (branco e azul) em seu interior.

Ao cortar o isolamento, para deixar o condutor descoberto, foi tomado o cuidado para não marcá-lo com o alicate, pois isto leva à ruptura do mesmo com qualquer movimento da fiação.

Conforme os fios eram unidos com cada filamento do *strain gage*, uma fita isolante era colada em cada conexão. Neste procedimento, é importante assegurar a integridade dos filamentos segurando a base do *strain gage*.

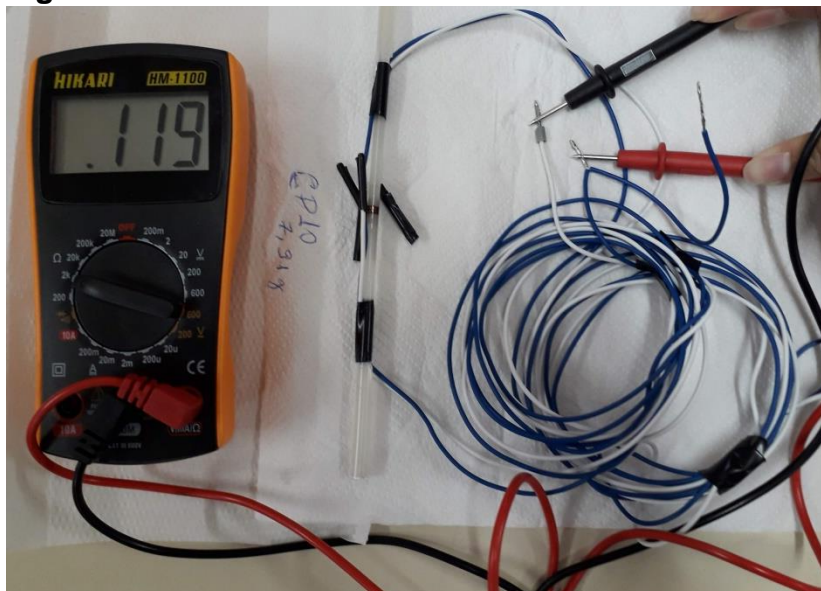
**Figura 42** - União da fiação do *strain gage* com fio flexível e isolamento com fita isolante 3M



Fonte: a própria autora

Em seguida, mais uma vez a resistência foi checada.

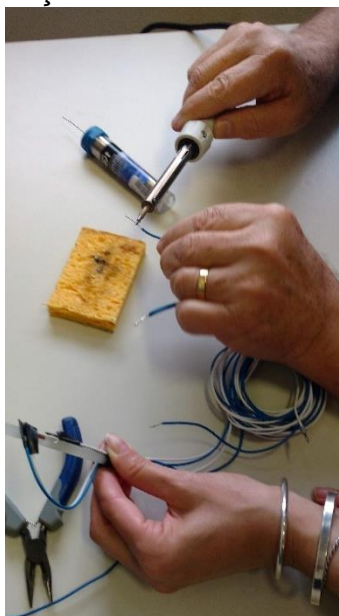
**Figura 43 - Fios flexíveis testados com multímetro**



**Fonte:** a própria autora

A figura 44 mostra uma extremidade do fio unida ao *strain gage* e a outra com os filamentos sendo soldados, utilizando solda de estanho da marca Best (tubo de 25g).

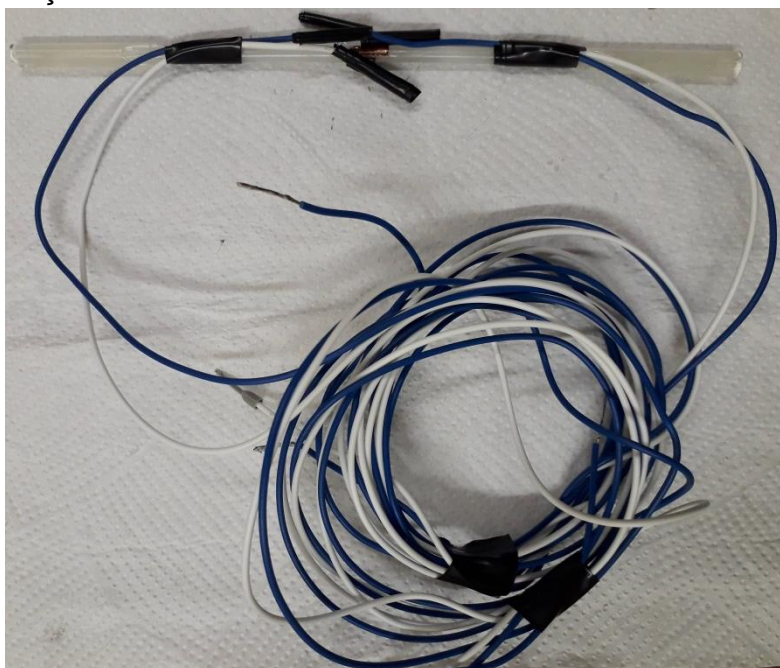
**Figura 44 - Soldando a fiação**



**Fonte:** a própria autora

Na figura 45, é possível verificar como a fiação foi organizada prevenindo a movimentação dos fios, observa-se também o corpo de prova preparado para o ensaio à tração com conjunto de cabos apropriados para sua conexão com o sistema de aquisição de dados.

**Figura 45** - Corpo de prova preparado para ensaio à tração



**Fonte:** a própria autora

### 3.1.5 Ensaios de caracterização das cavilhas com *Strain Gages*

Os testes foram efetuados de acordo com a norma americana ASTM D 638-08.

O equipamento utilizado no ensaio (EMIC DL 30000) possui par de garras auto travante por efeito cunha, para ensaios de tração com capacidade máxima 2000 Kgf com pré-aperto por sistema de rosca e jogo de mordentes para corpo de prova redondo de Ø3 mm a Ø8 mm.

O sistema de aquisição de dados utilizado trata-se do Lynx AqDados 7.2.

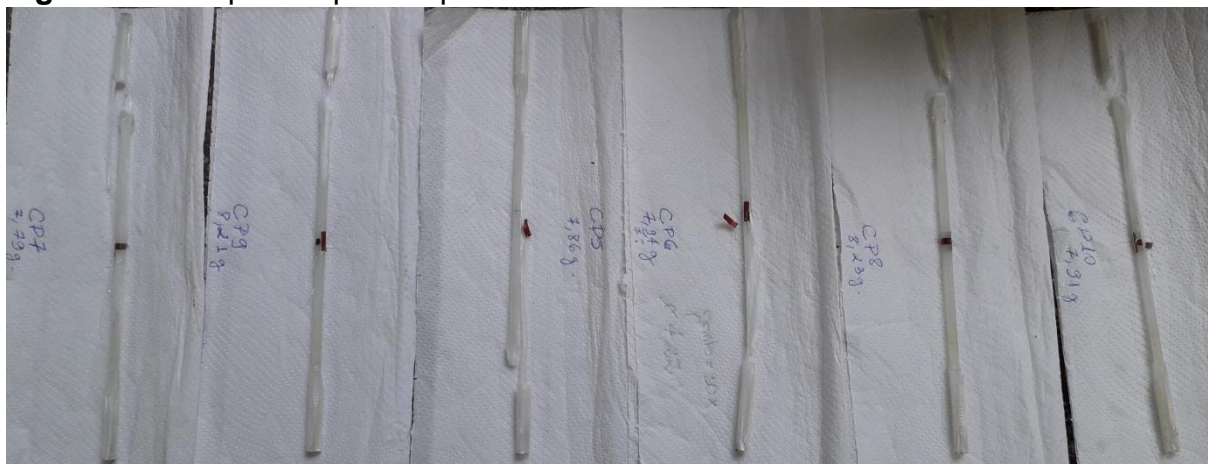
**Figura 46** - Da esquerda para a direita: Corpo de prova na EMIC DL 30000 com fios ligados ao sistema de aquisição de dados Lynx AqDados 7.2, corpo de prova antes da ruptura e corpo de prova após ruptura.



Fonte: a própria autora

A figura 47 mostra o modo de ruptura dos seis corpos de prova após o ensaio.

**Figura 47** - Corpos de prova após ensaio



Fonte: a própria autora

### 3.2 EXECUÇÃO E ENSAIO À TRAÇÃO DO MODELO COM LIGAÇÕES DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

A segunda etapa da investigação consiste em realizar o ensaio à tração das emendas com ligações cavilhadas de compósito estrutural.

#### 3.2.1 Madeira

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizadas treze tábuas de madeira *Pinus* spp. adquiridas em madeireira da região e estocada no laboratório de maquetes por longo período, durante o qual houve secagem ao ar livre.

As tábuas possuem dimensões médias de 2 cm de espessura, 30 cm de largura e 300 cm de comprimento, com umidade em média de 12%, medida através do higrômetro DUC 2050 L, da marca Digisystem, calibrado com densidade aparente da madeira de 0,55 g/cm<sup>3</sup>.

**Figura 48** - Medição da umidade da madeira



**Fonte:** a própria autora

Cada tábua inicialmente foi desdobrada em duas com metade da largura da tábua original, com dimensões médias de 2 cm de espessura, 14 cm de largura e 300 cm de comprimento.

**Figura 49** - Tábuas 30 cm de largura, perfilamento das tábuas e tábuas 14 cm largura



Fonte: a própria autora

### 3.2.2 Classificação da Madeira

A Classificação das tábuas de madeira *Pinus* spp. foi realizada no laboratório de estruturas da UEL (Universidade Estadual de Londrina).

Inicialmente foram levantadas as dimensões das vinte e seis tábuas, seu peso e teor de umidade. As propriedades geométricas foram obtidas em três seções de cada tábua por meio de paquímetro digital da marca Digimess (largura e altura) e trena (comprimento), a pesagem foi realizada em balança digital 9094, marca Toledo.

Após a coleta desses dados, foi realizada a classificação visual das tábuas através do Manual de Classificação Visual de Peças Estruturais de Madeira Tipo *Pinus* (MOURA; PLETZ, 2012) apresentado no anexo C.

Dezesseis das tábuas analisadas foram classificadas como pertencentes à classe estrutural nº 3, seis tábuas fazem parte da classe estrutural nº 2 e quatro tábuas foram classificadas visualmente como sendo da classe estrutural nº 1.

Em seguida, foi realizada também a classificação mecânica estática das tábuas no pórtico metálico de reação ligado ao sistema de aquisição de dados.

No pórtico foi utilizada célula de carga de dez toneladas no cilindro hidráulico com capacidade para trinta toneladas. O pórtico é equipado com medidor de deslocamento LVDT de 100 mm de curso.

Foi aplicada uma força de 500 N nas tábuas bi apoiadas, para a determinação de seus módulos de elasticidade efetivos, seguindo os procedimentos recomendados no Anexo B da NBR 7190/97. A maioria das tábuas foram classificadas como pertencentes à classe C20 (18 tábuas).

**Figura 50** - Classificação mecânica estática (carregamento)



Fonte: a própria autora

Por último, foi realizada a classificação mecânica dinâmica utilizando o Ultrassom USLab da marca Agricef, que possui velocidade de pulso ultrassônico com resolução da medição de  $0,1 \mu\text{s}$ , voltagem de pulso de 700 V, frequência nominal do transdutor de 45 kHz .

Esse equipamento mede a velocidade média da onda em m/s, através do tempo decorrido desde a emissão da onda até sua recepção (em  $\mu\text{s}$ ). O equipamento foi calibrado com distância percorrida pelo pulso de 3m (comprimento da tábua e distância entre os transdutores).

**Figura 51** - Ultrassom USLab da marca Agricef



Fonte: a própria autora

Para que os transdutores estivessem inteiramente em contato com a superfície da madeira, a fim de evitar erro na leitura, foi aplicado gel acoplante na interface de medição.

As tábuas foram apoiadas em dois cavaletes e a disposição dos transdutores utilizada foi a direta, que assegura a transmissão máxima do sinal entre eles.

**Figura 52** - Classificação mecânica dinâmica (ultrassom)



Fonte: a própria autora

Com os valores das velocidades das ondas e a densidade de cada peça, foi possível calcular o módulo de elasticidade individual. A maioria das tábuas foi classificada como pertencente à classe C30 de resistência (24 tábuas).

$$E_d = V^2 \cdot \delta \quad (\text{eq. 4})$$

Em que:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico

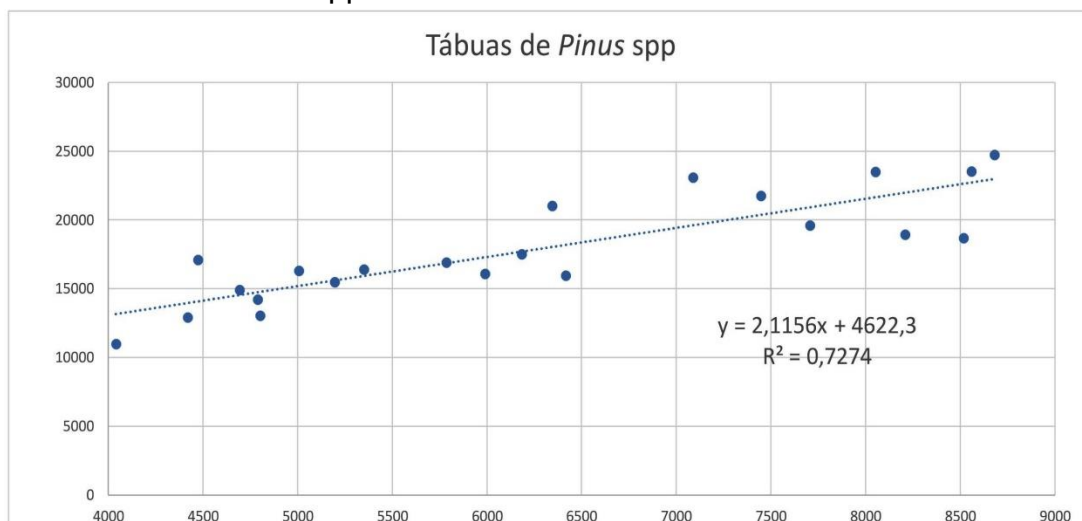
$V$  = velocidade de propagação da onda ultrassônica

$\delta$  = densidade da madeira

A figura 53 ilustra a correlação linear obtida entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático, apresentando os valores individualizados de todas as 26 tábuas classificadas.

Quatro tábuas apresentaram correlação linear entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático muito distinto da média das outras tábuas, sendo responsáveis pela não normalidade dos dados e consideradas como pontos espúrios da análise. Sendo assim, se isolarmos as tábuas L05, L07, L12 e L25 da análise estatística, verifica-se uma boa correlação entre as duas grandezas.

**Figura 53** - Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático da madeira de *Pinus* spp.



**Fonte:** print screen do programa Excel

Os dados observados na classificação visual, na classificação mecânica estática (flexão) e na classificação mecânica dinâmica (ultrassom) estão apresentados em forma de tabela no apêndice C.

É possível observar no apêndice C que os valores apresentados para o módulo de elasticidade das tábuas de *Pinus* spp. classificadas pelo método de ultrassom são superiores ao módulo de elasticidade que esta espécie geralmente apresenta. Este fato é explicado por Trinca e Gonçalves (2009) que relatam que a dimensão da seção transversal da peça em relação ao diâmetro do transdutor afeta a condição de meio infinito e também o resultado do ensaio. Quando o diâmetro do transdutor não está, algumas vezes, no mínimo circunscrito à seção transversal da peça ocorre o fenômeno denominado “efeito de parede”.

Somado a isso, se o transdutor envolve toda a seção da peça, fato que ocorreu nesta classificação, o fenômeno da transmissão confina a onda ao corpo de prova como uma guia de onda afetando a condição teórica de ondas planas (BUCUR, 2006).

### 3.2.3 Execução dos Modelos

Nesta fase da investigação foram testadas duas tipologias de cavilhas, sendo uma pré-impregnada e outra curada *in situ*. Segundo as recomendações do Anexo C da NBR 7190/97 para cada tipologia de ligação, o tamanho da amostra deve ser de no mínimo seis corpos de prova, mais um (1) corpo de prova gêmeo para estimar a resistência da madeira através de ensaio destrutivo para determinação da rigidez. Portanto, foram necessários quatorze corpos de prova.

Para cada corpo de prova é necessária uma tábua e meia de madeira (dimensões tábua (E x L x C) = 2cm x 14cm x 300cm), conforme figura 54.

A organização foi elaborada de modo que a tábua com menor módulo de elasticidade fizesse parte do mesmo corpo de prova da tábua com maior módulo de elasticidade e assim sucessivamente.

Para tanto, foram utilizados os módulos de elasticidade efetivos obtidos na classificação mecânica estática que são mais confiáveis, pois os dados da classificação mecânica por ultrassom foram superestimados conforme explicado no item 3.2.2 do trabalho.

Os módulos de elasticidade efetivos obtidos na classificação mecânica estática foram submetidos ao programa de análise estatística BioEstat (versão 5.0). Os dados foram analisados com intervalo de confiança 95%, de 5492,19 MPa a 6695,15 Mpa. As tábuas foram organizadas almejando que os quatorze corpos de

prova tivessem um padrão de homogeneidade quanto ao seu módulo de elasticidade (MOE).

Na tabela 6, é possível verificar os pares de tábuas e seus respectivos módulos de elasticidade.

**Tabela 6 - Pares de homogeneidade**

<b>Tabela de Organização das tábuas de madeira <i>Pinus spp</i></b>				
Data: 29/06/2018		Programa utilizado: BioEstat (versão 5.3)		
<b>IC 95%, 5492,19 MPa - 6695,15 Mpa</b>				
Tábua	Ec0 (MPa)	Tábua	Ec0 (MPa)	Média Ec0 (MPa)
L08	4040,44	L17	8678,15	6359,29
L02	4418,14	L23	8557,19	6487,66
L14	4473,72	L06	8208,25	6340,99
L01	4692,05	L18	8050,00	6371,03
L04	4787,96	L24	7705,64	6246,80
L10	4801,14	L19	7446,18	6123,66
L07	4858,28	L11	7086,68	5972,48
L13	5005,07	L12	6743,05	5874,06
L09	5195,28	L15	6415,38	5805,33
L21	5349,68	L22	6342,58	5846,13
L05	5438,28	L16	6182,16	5810,22
L20	5784,08	L03	5988,83	5886,46

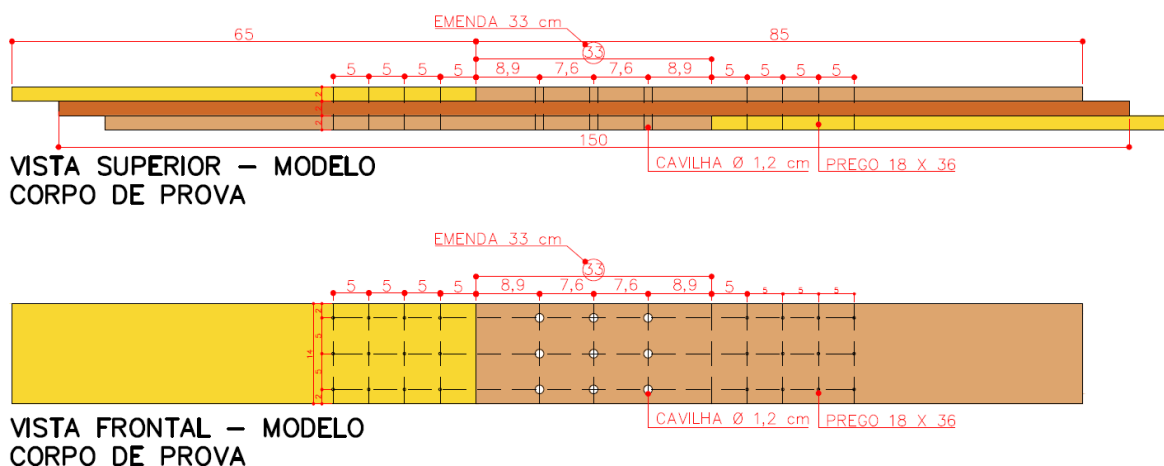
**Fonte:** a própria autora

Uma questão importante a ser observada na tabela acima é que nela constam apenas as tábuas L01 até a L24. Isto se deve ao fato de que inicialmente essas foram as tábuas separadas para a investigação, porém erros ocorreram na manipulação e foi necessária a inclusão de mais duas tábuas (L25 e L26).

Para a execução dos modelos, foi adaptada a proposta de Recco (2015), em que a dimensão média dos corpos de prova possui 6 cm de espessura, 14 cm de largura e 150 cm de comprimento.

Cada corpo de prova foi composto por cinco peças de 2 cm de espessura, 14 cm de largura e comprimentos variados, sendo a camada do meio (interna) contínua, com 1,50 m de comprimento. Cada uma das camadas externas foi composta por uma peça de 65 cm e outra de 85 cm de comprimento, gerando 33 cm de medida entre as emendas, conforme ilustrado na figura 54.

**Figura 54 - Detalhe do modelo**



Fonte: a própria autora

Sendo assim, as vinte e seis tábuas foram inicialmente nomeadas de L01 até L26 a fim de que se pudesse ter um rastreamento da origem de cada peça após seu aparelhamento e corte.

As regiões das peças que deveriam ser descartadas por conterem defeitos e nós eram marcadas e cada corpo de prova foi nomeado e enumerado como CP1 até CP14. As peças com diferentes comprimentos que fazem parte de um mesmo corpo de prova foram identificadas com uma sequência alfabética: peças A (0,65cm de comprimento), B (0,85cm de comprimento) e C (1,50cm de comprimento), para serem cortadas. Portanto, uma peça L21, CP4-B, por exemplo, é originária da tábua 21, faz parte do corpo de prova 4 e possui 85cm de comprimento.

**Figura 55 - Tábuas nomeadas e enumeradas**



Fonte: a própria autora

Por fim, os corpos de prova ficaram demarcados conforme a tabela 7.

**Tabela 7 - Composição dos corpos de prova**

Tabela com Peças de <i>Pinus spp</i> utilizadas nos Corpos de Prova					
Corpo de Prova	Primeira Camada (Externa)		Segunda Camada (Interna)	Terceira Camada (Externa)	
	Peça B (0,85 m)	Peça A (0,65 m)	Peça C (1,50 m)	Peça A (0,65 m)	Peça B (0,85 m)
CP1	L8	L17	L17	L8	L8
CP2	L14	L2	L23	L2	L2
CP3	L14	L6	L23	L6	L14
CP4	L1	L18	L6	L18	L1
CP5	L1	L4	L24	L4	L4
CP6	L10	L10	L24	L10	L10
CP7	L7	L11	L19	L7	L7
CP8	L12	L12	L19	L11	L13
CP9	L13	L9	L11	L12	L13
CP10	L9	L15	L15	L15	L9
CP11	L21	L21	L22	L22	L21
CP12	L22	L5	L16	L3	L16
CP13	L20	L3	L3	L20	L20
CP14	L26	L25	L26	L25	L25

Fonte: a própria autora

As peças foram cortadas de acordo com as marcações dos corpos de prova.

**Figura 56 - Regiões com nós e defeitos e peças sendo cortadas**



Fonte: a própria autora

E as regiões demarcadas com X, as quais continham defeitos e nós, foram descartadas conforme figura 57.

**Figura 57 - Nós e defeitos descartados**



**Fonte:** a própria autora

Depois de cortadas, as peças foram agrupadas de acordo com o corpo de prova a qual pertenciam.

**Figura 58 - Corpos de prova agrupados**

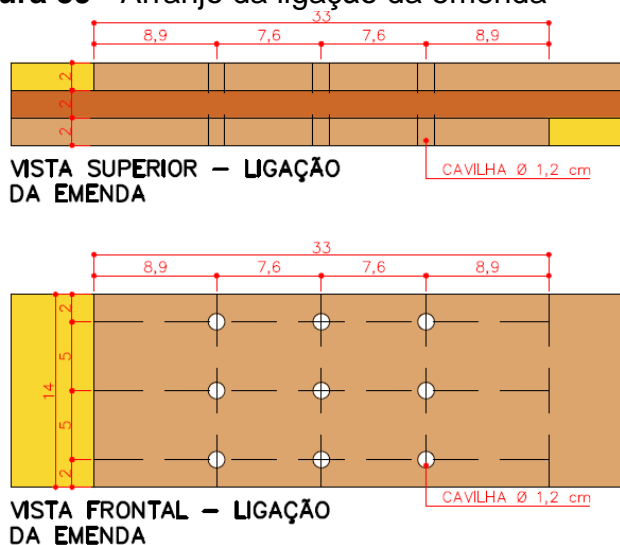


**Fonte:** a própria autora

### 3.2.4 Concepção do Arranjo da Ligação por Compósito Estrutural

Para o arranjo da ligação da emenda elaborou-se uma proposta de acordo com os espaçamentos mínimos entre elementos de ligação recomendados pela NBR 7190 (ABNT, 2010).

A região de emenda possui 33 cm e é composta pela camada central contínua e as camadas externas descontínuas, com emendas desencontradas. As camadas foram conectadas por nove cavilhas elaboradas com compósito estrutural, conforme figura 59.

**Figura 59 - Arranjo da ligação da emenda**

Fonte: a própria autora

### 3.2.4.1 Cavilhas pré-fabricadas

As cavilhas em compósito estrutural pré-fabricadas foram confeccionadas seguindo a mesma metodologia do ensaio com *strain gages*, porém por se tratar de diâmetro maior, como molde foi utilizada mangueira transparente com diâmetro interno de  $\frac{1}{2}$ ".

As mangueiras transparentes possuem uma leve curvatura e a fim de minimizá-la, elas foram cortadas com 18 cm de comprimento e imersas em água quente.

Com o amolecimento do silicone por temperatura, foram colocadas em bancada de mármore e retificadas através de movimento circular.

Após esse processo, os moldes foram aderidos a peças de madeira por meio de fita adesiva transparente, mantendo-os retilíneos. Em seguida, foi aplicado desmoldante em todos os moldes.

**Figura 60 - Molde imerso em água quente, moldes aderidos à peça de madeira e aplicação de desmoldante**



Fonte: a própria autora

Assim como no ensaio anterior, as fibras de vidro foram cortadas e por meio do processo de pultrusão manual as fibras passaram por um banho de resina e, com o auxílio de fio metálico, foram posicionadas dentro do molde.

**Figura 61** - Banho de resina e fibras posicionadas no molde



Fonte: a própria autora

Após a cura, as cavilhas foram desenformadas, cortadas com 6 cm de comprimento cada e retificadas na matriz para confecção de cavilhas.

**Figura 62** - Cavilhas pré-fabricadas e cavilhas com 6 cm de comprimento sendo retificadas



Fonte: a própria autora

Realizou-se a furação nas peças de madeira *Pinus* spp. com auxílio de um gabarito para otimizar o processo, em seguida, as cavilhas pré-fabricadas foram mergulhadas em resina para facilitar a inserção e ao mesmo tempo aderir à parede do furo.

**Figura 63** - Furação com auxílio de gabarito e cavilhas inseridas no corpo de prova



Fonte: a própria autora

Para manter as extremidades do corpo de prova (região entre as emendas e as garras do aparato) mais resistentes que o trecho central, foram dispostos doze pregos 18 x 36 de cada lado.

#### 3.2.4.2 Cavilhas curadas *in situ*

Os corpos de prova elaborados com cavilhas de compósito estrutural curadas *in situ* foram fabricados do mesmo modo. Preparo da mistura (epóxi e endurecedor), pesagem das fibras e banho das fibras em resina.

Esse processo se difere, pois nenhum molde foi utilizado. O procedimento consiste em executar a furação nos corpos de prova com o diâmetro desejado (12,88 mm) e passar as fibras banhadas em resina com auxílio de fio metálico pelo interior dos furos. A cura ocorreu após 24h à temperatura ambiente.

**Figura 64** - Fibra sendo impregnada com resina e fibra impregnada sendo passada nas peças de madeira com auxílio de fio metálico



Fonte: a própria autora

Após a cura, os excessos das extremidades foram cortados com serra circular.

**Figura 65 - Excessos sendo cortados**

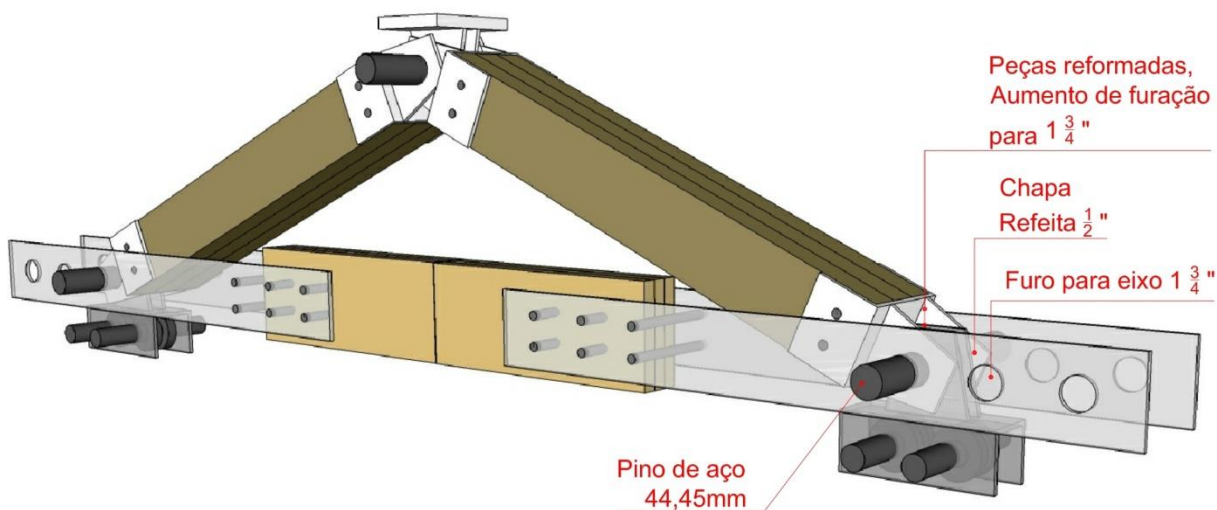


**Fonte:** a própria autora

### 3.2.5 Equipamentos Utilizados

Para o ensaio à tração dos corpos de prova foi utilizado o aparato fabricado por Recco (2015) com ajustes. As garras do aparato foram refeitas com chapa de 12,70 mm (no projeto original era de 6,35 mm). Para a rótula nas ligações e conexão das peças metálicas utilizaram-se pinos de aço 44,45mm (no projeto original era 30 mm) e para o deslizamento do apoio na base, mantiveram-se os patins com rolamentos.

**Figura 66 - Esquema reforma aparato**



**Fonte:** Adaptado Recco (2015)

A aplicação de força foi realizada através de pórtico metálico de reação equipado com sistema de aquisição de dados, o programa Lynx Aq Dados 7.2.

No cilindro hidráulico do pórtico foi utilizada célula de carga de vinte toneladas. O pórtico também foi equipado com medidor de deslocamento LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) de 100 mm de curso. Outro LVDT de 50 mm de curso foi instalado na ligação estudada a fim de medir o deslocamento relativo entre as peças da ligação.

**Figura 67** - Imagem do pórtico metálico com corpo de prova montado no aparato utilizando-se medidores LVDT



Fonte: a própria autora

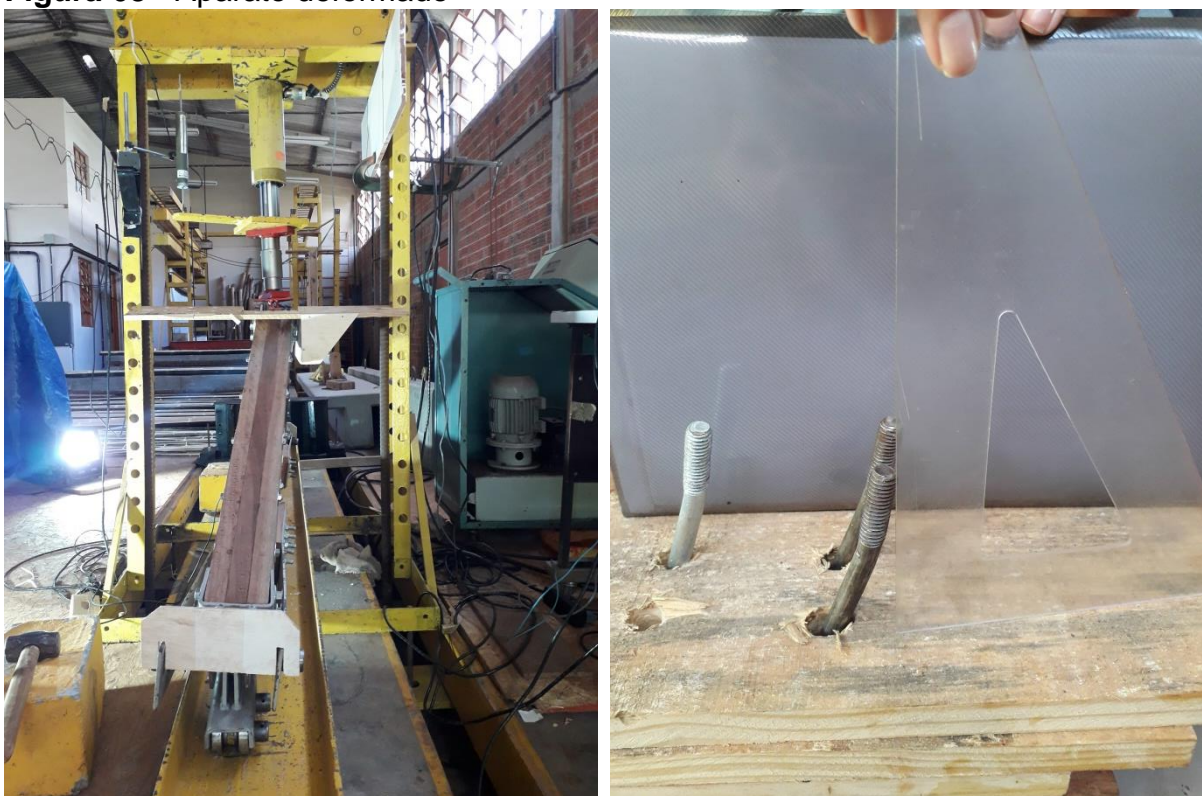
### 3.2.6 Ensaio à Tração da Emenda dos Modelos

Os testes foram efetuados de acordo com os procedimentos do anexo C da norma NBR7190/97, no laboratório de estruturas da UEL (Universidade Estadual de Londrina). A norma recomenda que seja realizado ensaio destrutivo de um modelo gêmeo, selecionado da mesma amostra a ser investigada, a fim de se verificar a resistência estimada ( $f_{t0,est}$ ) e que o carregamento seja aplicado em dois ciclos de carga e descarga, com 10% e 50% de  $f_{t0,est}$ .

Ao se iniciarem os ensaios, percebeu-se que a resistência  $f_{t0,est}$  atingida para o primeiro grupo foi de 75,4 KN e estava muito acima da resistência inicialmente estimada de 33,84 KN.

Após os ensaios desse grupo serem realizados, iniciaram-se os testes do grupo 2 para cavilhas curvas *in situ*, cujo valor de  $f_{t0,est}$  foi de 79 KN. Porém, no decorrer do ensaio do segundo corpo de prova (CP1), a estrutura do aparato se deformou, danificando o pórtico, conforme figura 68.

**Figura 68** - Aparato deformado



Fonte: a própria autora

Sendo assim, o aparato teve que ser reformado, reforçando-se sua estrutura conforme exposto no item 3.2.5 deste trabalho. Na sequência da manutenção e reparo do equipamento, os demais corpos de prova deste grupo foram ensaiados.

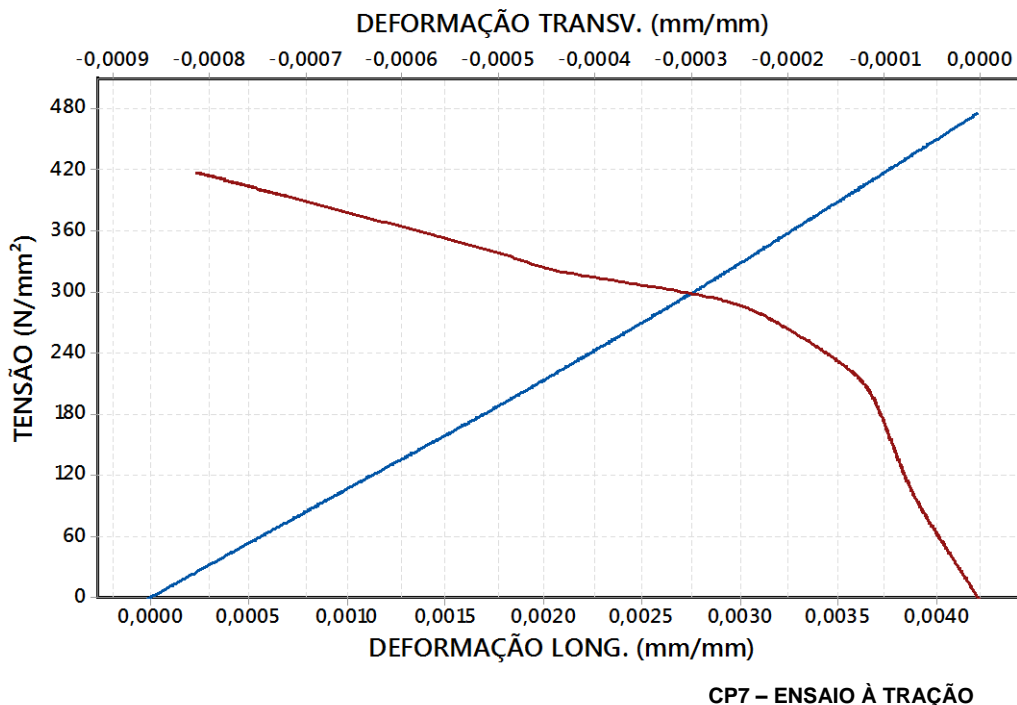
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do ensaio de caracterização mecânica das cavilhas e do ensaio à tração destrutiva dos modelos, em que se analisaram os parâmetros de interesse para a compreensão do comportamento da ligação.

### 4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

Para cada cavilha ensaiada foram computados os dados no programa Excel. Posteriormente, esses dados foram exportados para o software Minitab no qual foram geradas curvas tensão x deformação transversal e tensão x deformação longitudinal para cada uma das cavilhas.

**Figura 69** - Curva modelo tensão vs. deformação de um corpo de prova



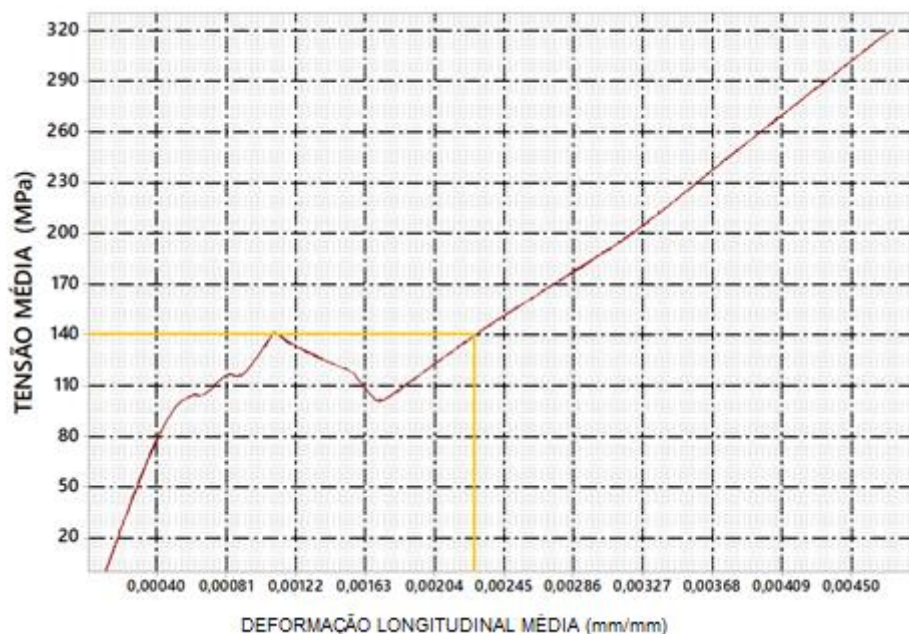
Fonte: a própria autora

Foram traçados gráficos das curvas médias tensão x deformação transversal e tensão x deformação longitudinal de cinco corpos de prova (CP5, CP7, CP8, CP9,

CP10). O corpo de prova CP6 foi isolado da média, pois o resultado observado foi incoerente e discrepante dos demais.

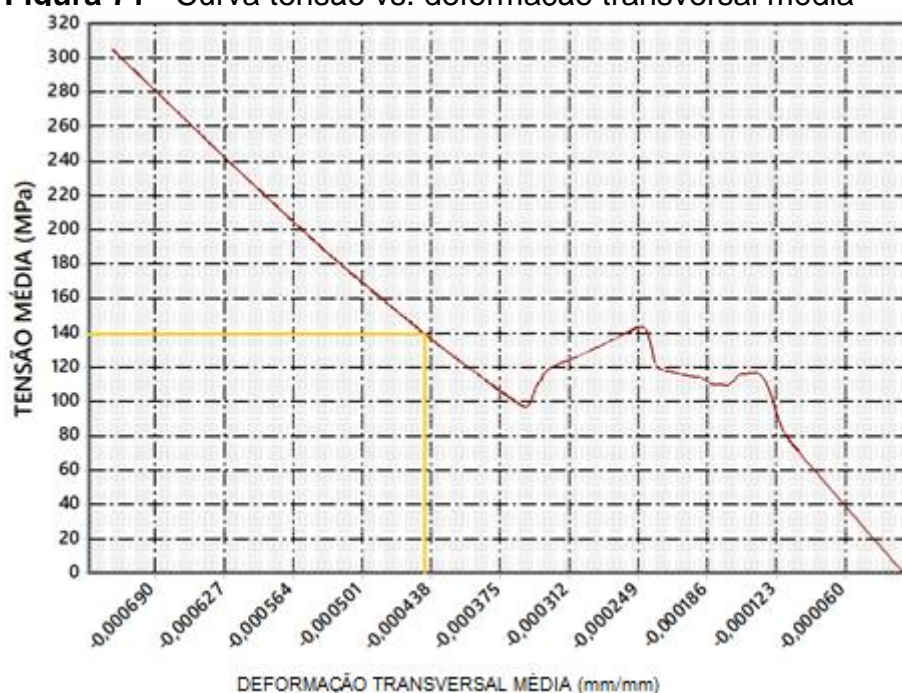
Esses gráficos foram analisados e para o cálculo dos módulos de elasticidade foi selecionado um ponto da curva, conforme procedimento realizado por Almeida (2019), que faz parte da região elástica, onde a declividade da curva se manteve constante, cuja tensão média é de 140 Mpa.

**Figura 70 - Curva tensão vs. deformação longitudinal média**



Fonte: a própria autora

**Figura 71 - Curva tensão vs. deformação transversal média**



Fonte: a própria autora

É possível observar que o gráfico com curva da média tensão x deformação transversal e tensão x deformação longitudinal mostraram alguns picos. Isso pode ter ocorrido por falta de pré-tensão nas garras da prensa, que ocasionou escorregamento do corpo de prova.

A partir dos dados obtidos no ensaio (tensão longitudinal de ruptura e deformações), foi possível caracterizar o material calculando uma estimativa do coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade longitudinal, o módulo de elasticidade de cisalhamento e a tensão de cisalhamento utilizando a formulação para materiais isotrópicos, por se tratar de uma abordagem inicial do tema.

Dados do ensaio:

$$\varepsilon_1 = 0,00228 \text{ mm/mm (deformação longitudinal)}$$

$$\varepsilon_2 = 0,000444 \text{ mm/mm (deformação transversal)}$$

$$\sigma_{1,2} = 140 \text{ MPa}$$

A estimativa do coeficiente de Poisson  $\nu$  obtido foi de 0,195, calculado através da seguinte equação:

$$\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (\text{eq. 5})$$

Em que:

$\varepsilon_1$  = deformação longitudinal em mm;

$\varepsilon_2$  = deformação transversal em mm.

Em seguida, realizou-se o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal  $E$ .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1} \quad (\text{eq. 6})$$

Em que:

$\sigma_{1,2}$  = tensão longitudinal de ruptura no ponto correspondente à deformação longitudinal é 0,00228 mm/mm e a transversal de 0,000444 mm/mm;

$\varepsilon_1$  = deformação longitudinal em mm.

O valor calculado foi de  $E = 61403,5 \text{ MPa}$ . O módulo de elasticidade de cisalhamento  $G$  foi de  $25691,84 \text{ MPa}$ , obtido pela seguinte equação:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{eq. 7})$$

Em que:

$E$  = módulo de elasticidade longitudinal;

$\nu$  = coeficiente de Poisson.

A resistência ao cisalhamento  $\tau$  foi de  $14,407 \text{ MPa}$  e obtida através da equação 8.

$$\tau = G \cdot \varepsilon_2 \quad (\text{eq. 8})$$

Em que:

$G$  = módulo de elasticidade de cisalhamento;

$\varepsilon_2$  = deformação transversal em mm.

Os resultados obtidos para a caracterização das cavilhas de compósito estrutural podem ser observados no quadro 3.

**Quadro 3** - Caracterização Cavilha de compósito estrutural

Propriedades	Resultado de ensaio à tração para caracterização das cavilhas
Tensão Média Longitudinal de Ruptura ( $\sigma$ )	320 MPa
Deformação Longitudinal ( $\varepsilon_1$ )	0,00228 mm
Deformação Transversal ( $\varepsilon_2$ )	0,000444 mm
Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,195
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E)	61403,5 MPa
Módulo de Elasticidade de Cisalhamento (G)	25691,84 MPa
Resistência ao Cisalhamento	14,407 MPa

Fonte: a própria autora

Esses dados foram a base para o cálculo do diâmetro da cavilha utilizado na etapa seguinte da investigação: Ensaio à tração dos modelos com ligações em compósito estrutural.

#### 4.1.1 Cálculo do Diâmetro da Cavilha

O cálculo do diâmetro da cavilha utilizada no ensaio à tração dos modelos em madeira *Pinus spp.* foi baseado nos resultados do trabalho de Recco (2015), pois almejava-se comparar os resultados das cavilhas com os de pregos ardox, utilizando o mesmo procedimento de ensaio.

Para que a cavilha de material compósito tivesse o mesmo desempenho do prego ardox de Recco (2015), o valor da Força  $F$  foi obtido dividindo-se o valor da resistência da ligação estimada, que é a resistência do modelo com ligações de prego ardox, pelo número de pregos:

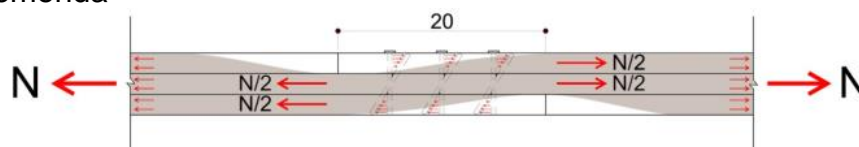
$$F = \frac{33840}{9} \text{ (Resistência da Ligação (RECCO, 2015))} \quad \text{(eq. 9)}$$

( número de pregos)

$$F = 3760 \text{ N}$$

De acordo com Recco (2015), a transmissão do esforço axial na região da emenda é realizada por duas lâminas, a central e uma externa. Sendo assim, uma parcela do esforço axial é transmitida pela lâmina central, devido a sua continuidade, e a parcela restante deste esforço é transmitida pela ligação, que transfere de uma lâmina externa para outra. Assume-se por hipótese que a ligação nesta emenda por seção de corte possui sollicitação igual à metade do esforço normal existente na barra composta.

**Figura 72** - Mecanismo de transferência de esforços na emenda



Fonte: Recco (2015)

$$F = \frac{3760}{2} = 1880 \text{ N} \quad \text{(eq. 10)}$$

Através da equação 11, o diâmetro  $d$  da cavilha de 12,88  $mm$  foi calculado.

$$\tau = \frac{F}{\pi d^2/4} \quad (\text{eq. 11})$$

Em que:

$\tau$  = tensão de cisalhamento (14,407  $MPa$ );

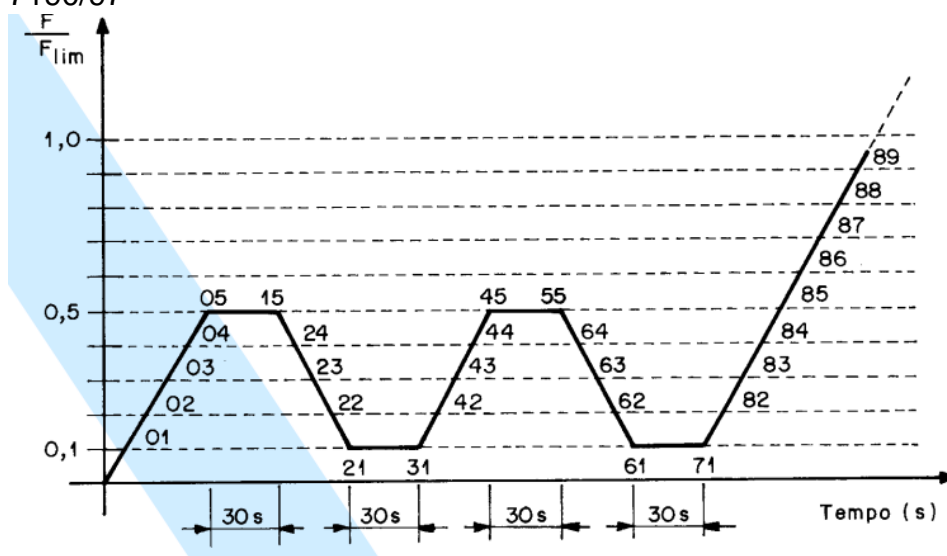
$F$  = resistência da ligação estimada (1880  $N$ ).

## 4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO À TRAÇÃO DO MODELO COM LIGAÇÕES DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

### 4.2.1 Resistência e Rigidez da Ligação

A análise da resistência das ligações com cavilhas de compósito estrutural foi realizada de acordo com as especificações da NBR 7190/97, mesma norma que embasou este ensaio. O ensaio realizou-se em dois ciclos de carga e descarga, 10% e 50% da resistência estimada da amostra -  $f_{t0,est}$ , conforme recomendações do anexo C da NBR 7190/97.

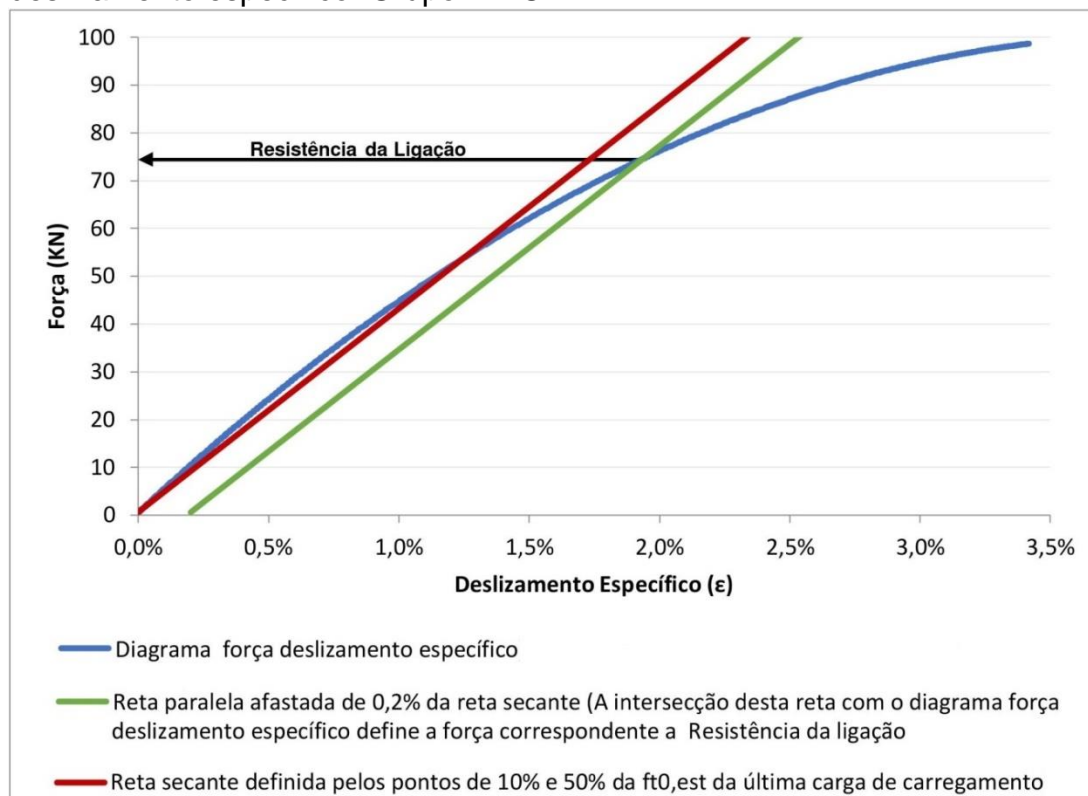
**Figura 73** - Diagrama de carregamento determinado pela NBR 7190/97



Fonte: NBR 7190/97

Para análise, elaboraram-se diagramas força (KN) x deslizamento específico (%), nos quais a resistência da ligação de cada um dos corpos de prova foi encontrada através da reta paralela afastada 0,2% da reta secante definida pelos pontos de 10% e 50% da  $f_{t0,est}$ .

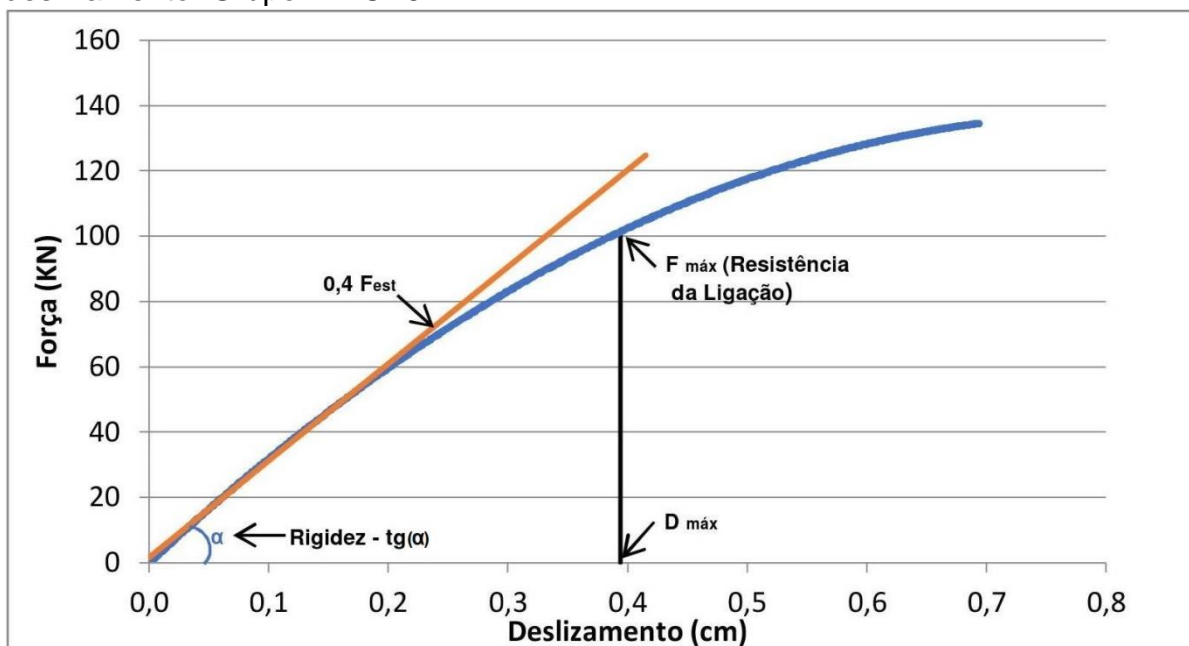
**Figura 74** - Gráfico modelo do ensaio de tração da ligação. Diagrama força x deslizamento específico. Grupo 1 – CP7.



**Fonte:** a própria autora

Já a rigidez foi obtida por meio do diagrama força (KN) x deslizamento (cm) e analisada de acordo com a norma Europeia EN 26891, mostrada na figura 75. A finalidade desta análise é a comparação dos valores calculados com o alcançado em ensaio, como sugerido por Branco (2003).

**Figura 75** - Gráfico modelo do ensaio de tração da ligação. Diagrama força x deslizamento. Grupo 2 – CP9.



Fonte: a própria autora

Com este diagrama foram identificados os parâmetros analisados: Força máxima suportada pela ligação ou valor atingido para um deslocamento de 15 mm ( $F_{máx}$ ) (resistência da ligação), deslizamento máximo correspondente à força máxima ( $D_{máx}$ ) e módulo de deslizamento instantâneo ( $k_{ser}$ ), equivalente à rigidez da ligação elaborada a partir da reta de regressão linear sobre a curva entre 0,1 e 0,4  $F_{est}$ .

O valor do módulo de deslizamento instantâneo é obtido através da equação:

$$k_{ser} = 0,4F_{est} / v_{i,mod} \quad (\text{eq. 12})$$

Em que:

$F_{est}$  = valor da força estimada (N);

$v_{i,mod}$  = valor do deslizamento inicial obtido pela equação 13.

$$v_{i,mod} = 4/3 (v_{0,4} - v_{0,1}) \quad (\text{eq. 13})$$

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

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

Os quadros 4 e 5 apresentam os resultados calculados e os obtidos em ensaio (regressão linear) de rigidez e a resistência das ligações para os grupos 1 e 2, respectivamente.

**Quadro 4 - Resultados obtidos para o Grupo 1 – Pré-fabricadas**

Grupo 1 - Cavilha pré-fabricada (BARCAROLO, 2019)	Resistência da ligação Fmax (KN)	Deslocamento Máximo Dmax (mm)	Módulo de deslizamento instantâneo Kser (KN/mm)	
			EN 26891 (1991)	Regressão Linear - Rigidez
CP4	73,70	2,23	38,50	41,67
CP7	74,50	1,48	35,93	58,91
CP10	51,00	3,03	29,59	16,62
CP11	28,80	1,30	32,58	25,99
CP12	34,80	2,68	13,19	14,34
CP14	75,40	1,67	27,70	38,54
<b>MÉDIA</b>	<b>56,37</b>	<b>2,07</b>	<b>29,58</b>	<b>32,68</b>
DP	21,19	0,70	8,96	16,98
CV	37,60%	33,69%	30,28%	51,97%

Fonte: a própria autora

**Quadro 5 - Resultados obtidos para o Grupo 2 – Moldadas *in situ***

Grupo 2 - Cavilha curada <i>in situ</i> (BARCAROLO, 2019)	Resistência da ligação Fmax (KN)	Deslocamento Máximo Dmax (mm)	Módulo de deslizamento instantâneo Kser (KN/mm)	
			EN 26891 (1991)	Regressão Linear - Rigidez
CP1	129,50	2,04	49,31	68,97
CP5	79,00	3,28	16,83	22,10
CP6	72,20	1,06	57,92	70,10
CP8	56,20	2,04	23,63	40,99
CP9	101,50	3,94	25,29	29,65
CP13	67,80	1,21	31,82	55,30
<b>MÉDIA</b>	<b>84,37</b>	<b>2,26</b>	<b>34,13</b>	<b>47,85</b>
DP	26,74	1,14	16,06	20,19
CV	31,70%	50,42%	47,05%	42,19%

Fonte: a própria autora

O desempenho das cavilhas do grupo 2 (curadas *in situ*) foram superiores aos observados no grupo 1 (pré-fabricadas) em 49% na resistência da ligação e em 46% na rigidez.

O valor médio do deslocamento máximo foi de 2,07 mm para o grupo 1 e 2,26 mm para o grupo 2, valores muito abaixo do máximo de 15 mm definidos pela norma.

Para cavilhas pré-fabricadas o valor da rigidez obtido em ensaio (regressão linear) foi 11% superior ao calculado de acordo com a EN 26891 (1991) e para as cavilhas curadas *in situ* esta porcentagem foi de 40%.

A análise do módulo de deslizamento instantâneo ( $k_{ser}$ ) demonstra variabilidade dos resultados, assim como os de regressão linear obtidos no ensaio.

É interessante observar que os valores calculados em geral subestimam os obtidos nos ensaios quanto à Rigidez (regressão linear), sendo assim, os parâmetros da norma EN 26981 (1991) podem ser reconsiderados no que se refere a ligações cavilhadas em compósito estrutural.

#### 4.2.2 Comparação com a Literatura

O estudo de Recco (2015) foi a base para a execução dos modelos de corpos de prova, neste trabalho, a ligação é composta por nove pregos de diferentes tipos (prego liso, prego liso com ponta dobrada e prego ardox), em um modelo de viga laminada de madeira, assim como o elaborado para esta pesquisa.

O quadro 6 traz a comparação entre os resultados obtidos neste ensaio para o grupo 1 e 2 com os observados por Recco (2015) para prego ardox.

É importante destacar que esta comparação foi possível, pois no ensaio das ligações cavilhadas foi utilizado o mesmo número de conectores que o ensaio das ligações pregadas.

Outro fator de relevância é que, como se almejava esta comparação, para o cálculo do diâmetro das cavilhas utilizou-se a resistência da ligação dos pregos ardox obtidos em ensaio, já que o intuito era saber qual diâmetro deveria ter as cavilhas em compósito estrutural para que tivessem desempenho semelhante aos pregos ardox com diâmetro de 3,4 mm. Para realizar este cálculo, também foram utilizados os dados obtidos no ensaio de caracterização das cavilhas, conforme consta no item 4.1 desta pesquisa.

Neste mesmo item do trabalho, foi exposto que a ligação cavilhada da emenda estudada possui, em uma seção de corte, uma solicitação igual à metade do esforço normal existente na viga laminada. Portanto, a resistência por cavilha por seção de corte foi calculada dividindo-se o valor da resistência da ligação por dezoito, referente a duas seções de corte e nove conectores, os resultados são apresentados no quadro 6.

**Quadro 6** - Resultados da resistência e da rigidez das ligações

Grupo 1 - Cavilha pré-fabricada (BARCAROLO, 2019)	Resistência da ligação (KN)	Rigidez da emenda 33 cm (KN/cm)	Resistência por cavilha por seção de corte (KN)
CP4	73,70	417	4,09
CP7	74,50	589	4,14
CP10	51,00	166	2,83
CP11	28,80	260	1,60
CP12	34,80	143	1,93
CP14	75,40	385	4,19
<b>MÉDIA</b>	<b>56,37</b>	<b>327</b>	<b>3,13</b>
DP	21,19	169,8	1,18
CV	38%	52%	38%
Grupo 2 - Cavilha curada <i>in situ</i> (BARCAROLO, 2019)	Resistência da ligação (KN)	Rigidez da emenda 33 cm (KN/cm)	Resistência por cavilha por seção de corte (KN)
CP1	129,50	690	7,19
CP5	79,00	221	4,39
CP6	72,20	701	4,01
CP8	56,20	410	3,12
CP9	101,50	297	5,64
CP13	67,80	553	3,77
<b>MÉDIA</b>	<b>84,37</b>	<b>479</b>	<b>4,69</b>
DP	26,74	202	1,49
CV	32%	42%	32%
Prego Ardox (RECCO, 2015)	Resistência da ligação (KN)	Rigidez da emenda 20 cm (KN/cm)	Resistência por prego por seção de corte (KN)
PC1	34,92	153	1,94
PC2	38,7	175	2,15
PC3	34,92	190	1,94
PC4	27,18	163	1,51
PC5	23,22	157	1,29
PC6	44,46	193	2,47
<b>MÉDIA</b>	<b>34</b>	<b>172</b>	<b>1,88</b>
DP	7,69	17	0,43
CV	23%	10,00%	23%

Fonte: a própria autora

A análise final dos experimentos mostra que, em geral, o prego ardox obteve os menores resultados e as cavilhas do grupo 2, curadas *in situ*, o melhor desempenho tanto em relação a rigidez quanto na resistência da ligação.

Os resultados obtidos no ensaio também foram comparados com outros encontrados na literatura, conforme tabela 8.

No ensaio de Recco (2015), já descrito anteriormente, a ligação pregada está à 90° em relação ao plano. Já os ensaios elaborados por Branco (2003), também foram realizados em peças de madeira, com ligações por pregos lisos em

diferentes angulações. O estudo de Almeida (2019) analisa dois tipos de ligações cavilhadas pré-fabricadas de compósito estrutural (half-lap – 90° e extremidade – 45°) em painéis de CLT.

**Tabela 8 - Comparação dos resultados do ensaio com a literatura**

Referência	Branco, 2003 Pregos lisos à 90°	Almeida, 2019 Half-Lap	Barcarolo, 2019 Cavilhas Pré-fabricadas	Barcarolo, 2019 Cavilhas curadas <i>in situ</i>	Recco, 2015 Pregos Ardox
Resistência da Ligação - F <sub>máx</sub> (KN)	3,51	13,18	56,37	84,37	33,84
Deslocamento Máximo - D <sub>max</sub> (mm)	14,03	14,73	2,07	2,26	-
Módulo de deslizamento instantâneo K <sub>ser</sub> (KN/mm)	1,2	1,72	29,58	34,13	-
Regressão linear - Rigidez (KN/mm)	1,196	2,29	32,68	47,85	17,2
Quantidade de conectores	2	4	9	9	9
Diâmetro conectores (mm)	3,8	6	12	12	3,4
Comprimento conectores (mm)	100	100	60	60	72
Resistência por conector por seção de corte (KN)	0,88	1,65	3,13	4,69	1,88

**Fonte:** a própria autora

A tabela 8 mostra a capacidade de resistência por conector por seção de corte, comparando os resultados, é possível observar que as ligações cavilhadas curadas *in situ* obtiveram maior desempenho.

Não foi considerada nesta análise a comparação entre o módulo de deslizamento e o deslocamento máximo, pois tem relação com a quantidade de conectores.

#### 4.2.3 Modo de Ruptura

Quanto ao modo de ruptura, observou-se no ensaio que as cavilhas estavam muito mais rígidas que a madeira, pois nenhuma cavilha se rompeu.

A ruptura ocorreu nas peças de madeira, na região da emenda, em todos os casos. No grupo 1, a ruptura ocorreu por cisalhamento longitudinal da madeira na linha das cavilhas em quatro corpos de prova (CP4, CP11, CP12 e CP14) e em dois corpos de prova por cisalhamento transversal da madeira na linha das cavilhas (CP7 e CP10).

Já no grupo 2, três corpos de prova foram rompidos por cisalhamento longitudinal na linha das cavilhas (CP1, CP5 e CP9) e três por cisalhamento

transversal na linha das cavilhas (CP6, CP8 e CP13). É importante ressaltar que neste grupo houve ancoragem da resina nas fibras da madeira.

**Figura 76** - Modo de ruptura por cisalhamento longitudinal e transversal



**Fonte:** a própria autora

Cabe observar que o fato da ruptura ter ocorrido em todos os casos nas peças de madeira se deve ao módulo de elasticidade médio da madeira utilizada ser de 7630,4 MPa e da cavilha de compósito estrutural ser 61403,5 Mpa.

Para obter-se resultados superiores, as cavilhas deveriam estar desalinhadas, ao invés de posicionadas em linhas retas, porém, esta configuração foi utilizada a fim de comparar os resultados com os dos pregos ardox, usando a mesma configuração.

Para que o resultado do desempenho das cavilhas seja mais próximo ao obtido para prego ardox, as cavilhas deveriam ter diâmetro menor que 12,88 mm ou estarem em menor quantidade (abaixo de nove unidades).

## 5 CONCLUSÕES

A fabricação de vigas laminadas de comprimento estrutural maior que três metros usando peças de madeira *Pinus* spp. com ligações cavilhadas demonstra ser uma opção viável diante da escassez de madeira proveniente de florestas nativas, com altas propriedades mecânicas.

Neste trabalho se analisaram ligações de compósito estrutural pré-fabricada e curada *in situ* em vigas de madeira laminada e, para o seu desenvolvimento, etapas foram delineadas, sendo que a primeira etapa da investigação compreendeu a caracterização das cavilhas elaboradas a partir de adesivo epóxi, endurecedor e fibra de vidro, por meio de ensaio à tração.

Para a fabricação das cavilhas observou-se que o processo de produção adequado é o de pultrusão, por permitir que toda a fibra seja impregnada na resina, e que a classificação visual possui relação com o desempenho das cavilhas, pois as amostras isentas de defeitos (bolhas e regiões esbranquiçadas) possuem resultados 55% superiores as com imperfeições.

No ensaio de caracterização das cavilhas com *strain gages*, foram obtidas as principais propriedades de interesse e como resultados foram observados para a tensão média longitudinal de ruptura 320 MPa, deformação longitudinal de 0,00228 mm, deformação transversal de 0,000444mm, coeficiente de Poisson de 0,195, módulo de elasticidade longitudinal de 61403,5 MPa, módulo de elasticidade de cisalhamento de 25691,84 MPa e tensão de cisalhamento de 14,407 MPa.

Os resultados da caracterização das cavilhas possibilitaram o cálculo do diâmetro das cavilhas utilizadas nas ligações do ensaio à tração dos modelos com peças de madeira *Pinus* spp. As cavilhas utilizadas nesse ensaio foram de 12,88 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento.

A segunda etapa da investigação compreendeu ensaio à tração das ligações. As peças de madeira desse ensaio foram classificadas visualmente, por ensaio à flexão e por ultrassom e foram agrupadas com um padrão de homogeneidade quanto ao módulo de elasticidade (MOE).

Foram ensaiados dois grupos de cavilhas, grupo 1 – ligações pré-fabricadas e grupo 2 – ligações curadas *in situ*.

O valor médio do deslocamento máximo do grupo 2 (2,26 mm) foi superior ao do grupo 1 (2,07 mm), valores muito abaixo do máximo de 15 mm definido pela norma EN 26981 (1991).

O valor da rigidez obtido em ensaio (regressão linear) foi superior ao calculado de acordo com a EN 26891 (1991) tanto para o grupo 1 (em 11%), quanto para o grupo 2 (em 40%). Portanto, os valores calculados em geral subestimam os obtidos nos ensaios e os parâmetros da norma podem ser reconsiderados no que se refere a ligações cavilhadas em compósito estrutural.

As ligações do grupo 1 apresentaram resultados inferiores ao observados no grupo 2, em 49% na resistência da ligação e em 46% na rigidez. As ligações cavilhadas curadas *in situ* apresentaram desempenho superior, visto que a resina impregna nas fibras da madeira, o que permite ao sistema um comportamento mais rígido com menores deformações.

É importante ressaltar que apesar da superioridade do desempenho das cavilhas curadas *in situ*, as pré-fabricadas são mais facilmente produzidas em escala para comercialização.

Nas comparações dos resultados com a revisão de literatura, concluiu-se que as ligações cavilhadas curadas *in situ* e as pré-fabricadas tiveram desempenho quanto à resistência por ligação por seção de corte em 4,69 KN e 3,13 KN, respectivamente, superiores aos encontrados para pregos lisos de 3,8 mm de diâmetro (0,88 KN), pregos ardox de 3,4 mm de diâmetro (1,88 KN) e ligações cavilhadas em compósito estrutural pré-fabricadas de 6 mm de diâmetro (1,65 KN).

A comparação da rigidez das ligações com os obtidos para prego ardox mostram que as cavilhas do grupo 1 e 2 obtiveram resultados superiores (32,68 KN e 47,85 KN, respectivamente) ao das ligações pregadas (17,20 KN).

Quanto ao modo de ruptura, nenhuma cavilha se rompeu. Em todos os corpos de prova a ruptura ocorreu por cisalhamento longitudinal ou transversal nas peças de madeira na linha das cavilhas.

O desempenho obtido no ensaio dos modelos de vigas laminadas com ligações cavilhadas foi acima do esperado, o que permite o redimensionamento das ligações diminuindo o diâmetro das cavilhas ou o número de conectores, permitindo economia de matéria-prima.

O caráter precursor desta pesquisa é de grande importância para o estudo de aplicação de materiais compósitos na indústria da construção civil e é inédito ao

utilizar compósito estrutural em ligações cavilhadas curadas *in situ*, pois até os dias atuais não foram encontrados na literatura estudos iguais.

Verificou-se que as normas consultadas não fazem menção ao dimensionamento de ligações axiais por corte para compósito estrutural em peças de madeira, o que evidencia a contribuição original deste trabalho.

## 6 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Outros estudos podem ser elaborados como:

Ensaio experimental do modelo diminuindo o número de cavilhas ou diminuindo o diâmetro das cavilhas;

Ensaio experimental do modelo posicionando as cavilhas ligeiramente desalinhadas;

Estudo exploratório do molde das cavilhas, a fim de melhorar ancoragem das cavilhas nas peças de madeira;

Ensaio experimental de flexão das vigas laminadas com comprimento estrutural acima de três metros de comprimento;

Aplicações de outras resinas na fase matriz e outras fibras na fase reforço do compósito.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; SHIMIZU, J.Y. **Cultivo de Pínus**. 2011. Disponível em:  
<[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemaasdeproducaolf6\\_1ga1ceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-3&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaold=3715&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicold=3228](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemaasdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-3&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaold=3715&p_r_p_-996514994_topicold=3228)>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- ALMEIDA, A. C. **Aplicações de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro – GFRP em ligações cavilhadas para CLT**. 2019. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Londrina, 2019.
- AMAYA, M. L. C. **Reforço de emendas dentadas com compósitos de fibras em peças de madeira**. 2013. 73 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1997). **NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira**. ABNT. Rio de Janeiro.
- BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H. A. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 27, n.3, p. 371-380, 2003.
- BONO, C, T. **Madeira laminada colada na arquitetura: sistematização de obras executadas no Brasil**. 1996. 365 f. Dissertação (Mestrado - Departamento de arquitetura-EESC) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- BOYLE, M. A.; MARTIN, C. J.; NEUNER, J. D. Epoxy Resin. **Constituent Materials**, Hexcel Corporation, p. 78-89, 2001.
- BRANCO, J. M. G. **Comportamento das Ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira-betão**. 2003. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães - Portugal, 2003.
- BRANCO, J.; SANTOS, A.; CRUZ, P. Asnas tradicionais de madeira: evolução, comportamento e reforço com materiais compósitos. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, [S.l.], N.º n, p.1-12, 2008.
- BRANTSEVA, T. V. et al. Epoxy modification with poly (vinyl acetate) and poly (vinyl butyral). I. structure, thermal, and mechanical characteristics. **Journal of Applied polymer science**, USA, APP. 44081, p.1-14, 7 July 2016.
- BUCUR, V. **Acoustics of wood**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 2006. 393p.
- CALLISTER JR, W, D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada/ William D. Callister, Jr.: tradução Sérgio Murilo Stamile**

Soares, revisão técnica Paulo Emílio Valadão de Miranda. – [Reimp.] – 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 702 p.

CARRASCO, E. V. M. Produção de vigas laminadas com madeira de Eucalipto. IN: SÓLIDOS DE EUCALIPTO: AVANÇOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS, 26-27., jun. 2002, Lavras - MG, p. 85-98.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus* spp. plantadas no Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba – SP, n.67, p.78-87, abr. 2005.

CHEUNG, A. B.; CALIL Jr. C. ; CARREIRA, M. R. ; MARTINEZ, M. Avaliação da resistência à tração de emendas dentadas em peças de madeira de dimensões estruturais. **Revista Ciência y Tecnologia**, Chile, 2002.

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), 2005 - **Istruzioni per Interventi di Consolidamento Statico di Strutture Lignee mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati**. CNR.

CRUZ, D. M. R. **Reforço de elementos estruturais de madeira com materiais compósitos de matriz polimérica**. 2015. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

DE, S.K., WHITE, J.R. **Short Fibre-Polymer Composites**. 1. ed. England: Woodhead Publishing Limited, 1996. 272 p.

DUARTE, R. S. **Avaliação do Comportamento de Ligações com Parafusos Auto-Atarraxantes em Vigas de MLC C**. 2004. 248 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Cultivo de Pinus**. Disponível em:

<[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemaasdeproducaolf6\\_1ga1ceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-3&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaold=3715&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicold=3228](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemaasdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-3&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaold=3715&p_r_p_-996514994_topicold=3228)>. Acesso em: 15 nov. 2017.

European Committee for Standardization. (1991). **EN 26891** - Timber structures: Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics, ISO 6891-1991 (E).

FAN, M. Performance of edgewise loaded wood based panels and their I-beam components. **Construction and Building Materials**, Washington, v. 30, p. 447-454, 2012.

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

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro.** 2005. 108 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de *Pinus* spp.: correlação entre resistência à tração e classificação visual. **R. Árvore**, Viçosa, MG, v.33, n.4, p.741-750, 2009.

FRANCO, R. A. V. S. **Produção de componentes em materiais compósitos por infusão de resina.** 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

GÓES, J. L. N. **Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I.** 2002. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2002.

GÓES, J. L. N.; DIAS, A. A. Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, v. 7, n. 29, p. 57-77, 2005.

GONÇALVES, R ; BARTOLOMEU, A. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v.4, n.2, p.269-274, 2000, DEAg/UFPB.

HERNÁNDEZ, R. Analysis of Strain in Finger – Jointed Lumber. IN: 5TH WORD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 1998, Montreux, Switzerland.

HULL, D. **An introduction to composite materials.** 2. ed. Cambridge University, 1996. 326 p.

Izzi M, Rinaldin G, Polastri A, Fragiaco M (2018) A hysteresis model for timber joints with dowel-type fasteners. **Engineering Structures**, 157:170-178.

JOKERST, R. W. **Finger-Jointed Wood Products.** Forest Products Laboratory. Research paper FPL 382. Madison, WI. EU, 1981. 24 p.

KERSTING, D. F. **Avaliação de resinas epóxi para fabricação de materiais compósitos pelo processo de pultrusão.** 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de UFRGS, Porto Alegre, 2004.

Kuentzer N, Simacek P, Advani SG, Walsh S. Correlation of void distribution to VARTM manufacturing techniques. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.** 2007; 38 (3): 802-13.

LEVY NETO, f. LCP. **Compósitos Estruturais.** Ciência e Tecnologia, São Paulo, 1. Ed, 2006.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 638 p.

MENDONÇA, P. T. **Materiais compostos e estruturas sanduíche: projeto e análise.** Florianópolis: Manole, 2001. 586 p.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 27, n. 2, p. 163-174, jul./dez. 2006.

MOURA, J. D. M.; PLETZ, E.; RECCO, E. G. **Qualidade e processo produtivo da madeira para a utilização em mobiliário.** 1. ed. Londrina: UEL, 2012. 112 p.

Murphy, John, *The Reinforced Handbook. 2nd. Elsevier Advanced Technology. Oxford, England, 1998*

OLIVEIRA, F. G. R. et al. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som. In: PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 3., 2003, Rio de Janeiro. p. 1-5.

OLIVEIRA, F. L. et al. Propriedades de madeira *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. **Rev. Inst. Flor.**, São Paulo, v. 18, n. Único, p. 59-70, dez. 2006.

ORTH, C. M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. T. Implicações do processo de fabricação do compósito plástico reforçado com fibra sobre o meio ambiente e a saúde do trabalhador: o caso da indústria automobilística. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.12, n. 2, p. 537-556, abr./jun. 2012.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224 p.

PINEDA, A. F. E. **Propriedades mecânicas, adesivas e adsorção de água de polímeros epoxídicos.** 2014. 61 f. Dissertação (Mestrado do programa de pós – graduação em materiais para engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

RECCO, E. G. **Análise experimental do sistema de cobertura caibro treliçado em MLP utilizando madeira serrada de *Pinus spp.*** 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado em metodologia de projeto) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

ROCCO LAHR, F. A.; CHRISTOFORO, A. L.; FIORELLI, J. Influence of nails size and layout to obtain the reduction coefficient of moment of inertia for timber beams with composite cross section. **Engenharia Agrícola (Online)**, v. 36, p. 715-723, 2016.

ROSS, R. J; et al. **“Inspection of Timber Bridges Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools”.** 1999. 17 p. Gen. Tech. Rep. FLP-GTR-114 USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison, WI.

SANTOS, G. M. et al., **Análise da propriedade mecânica de tração em perfis estruturais pultrudados em fibra de vidro e resina termofixa.** São José dos Campos: XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2009.

SHIMIZU, J. Y. Pínus na Silvicultura Brasileira. **Embrapa Florestas**, Colombo – PR, p.1-7, 2008.

TRINCA, A.L.; GONSALVES, R. Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultrassom na madeira. **Revista Arvore**. Viçosa, MG, V. 33, n.1, p. 177- 184, 2009.

WAMBUA, P., IVENS, J., VERPOEST, I. Natural fibers: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**, v.63, i.9, p.1259-1264, July 2003.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

### Determinação do tamanho amostral com base na estimativa da proporção populacional

De acordo com a norma americana ASTM D 638-08, a quantidade mínima de corpos de prova para realizar ensaio à tração em materiais anisotrópicos é de dez amostras, sendo cinco normais e cinco paralelos com o eixo principal da anisotropia. Portanto, usando-se cinco amostras, medindo deformações longitudinal e transversal em cada uma delas, a norma é atendida.

Um dos parâmetros estatísticos cuja determinação afeta o tamanho da amostra é a proporção populacional.

Para tanto, a fórmula para cálculo do tamanho da amostra para uma estimativa confiável da PROPORÇÃO POPULACIONAL ( $p$ ) é dada por:

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 \cdot p \cdot q}{E^2}$$

Em que:

$n$  = Número de indivíduos na amostra.

$Z_{\alpha/2}$  = Valor crítico que corresponde ao intervalo de confiança desejado.

$p$  = Proporção populacional de indivíduos que pertence à categoria que estamos interessados em estudar.

$q$  = Proporção populacional de indivíduos que não pertence à categoria que estamos interessados em estudar ( $q = 1 - p$ ).

$E$  = Margem de erro ou erro máximo de estimativa. Identifica a diferença máxima entre a proporção amostral e a verdadeira proporção populacional ( $p$ ).

Segundo a norma americana ASTM E122-07 para cálculo do tamanho amostral, os valores a  $Z_{\alpha/2}$  que correspondem aos intervalos de confiança mais utilizados podem ser observados na tabela 9.

**Tabela 9** - Valores críticos associados ao grau de confiança na amostra

Grau de Confiança	$\alpha$	Valor Crítico $Z_{\alpha/2}$
90%	0,10	1,645
95%	0,05	1,96
99%	0,01	2,575

**Fonte:** Determinação do tamanho de uma amostra  
Disponível em: <http://www.cienciasecognicao.org/portal/wp-content/uploads/2011/09/Tamanho-da-Amostra-1-1.pdf>.  
Acesso em: 27/07/2018

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 0,15 \cdot 0,85}{0,1^2} = 4,89 \cong 5 \text{ (amostras)}$$

$$N = \frac{n}{p} = \frac{4,89}{0,15} = 32,65 \cong 33 \text{ (população)}$$

## APÊNDICE B

Determinação da fração volumétrica e da massa dos materiais que compõe a cavilha de compósito estrutural

### A- TESTE PRELIMINAR

Propriedades Geométricas da cavilha:

$\varnothing = 0,6$  cm; H= 15 cm

Regra das proporções:

Resina: 37%

Reforço: 63%

$$V_{cavilha} = \pi \cdot R^2 \cdot h = 3,14 \cdot 0,3^2 \cdot 15 = 4,239 \text{ cm}^3$$

$$V_{fibra} = 4,239 \cdot 0,63 = 2,670 \text{ cm}^3$$

$$V_{resina} = 4,239 \cdot 0,37 = 1,568 \text{ cm}^3$$

Proporção mistura em volume conforme manual técnico da resina (anexo A)

Araldite LY 1564: 100 = 66,67%

Aradur 2963: 50 = 33,33%

$$V_{araldite} = 1,568 \cdot 0,6667 = 1,045 \text{ cm}^3$$

$$V_{aradur} = 1,568 \cdot 0,3333 = 0,522 \text{ cm}^3$$

Densidade conforme manual técnico da resina (anexo A) e fibra (anexo B)

Araldite LY 1564: 1,15 g/cm<sup>3</sup>

Aradur 2963: 1,00 g/cm<sup>3</sup>

Fibra Advantex E-CR GLASS: 2,62 g/cm<sup>3</sup>

$$D = \frac{m}{V}; \quad m = D \cdot V$$

$$m_{araldite} = 1,15 \cdot 1,045 = 1,202 \text{ g}$$

$$m_{aradur} = 1,00 \cdot 0,522 = 0,522 \text{ g}$$

$$m_{fibra} = 2,62 \cdot 2,670 = 6,996 \text{ g}$$

**B – ENSAIO FINAL**

Propriedades Geométricas da cavilha:

Ø centro = 0,4 cm; Ø ext.= 0,6 cm; H= 19,5 cm

Regra das proporções:

Resina: 37%

Reforço: 63%

$$V_{cavilha} = \pi \cdot R^2 \cdot h = 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 19,5 = 2,450 \text{ cm}^3$$

$$V_{fibra} = 2,450 \cdot 0,63 = 1,543 \text{ cm}^3$$

$$V_{cavilha} = \pi \cdot R^2 \cdot h = (3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 11,5) + (3,14 \cdot 0,3^2 \cdot 8) = 3,705 \text{ cm}^3$$

$$V_{resina} = 3,705 - 1,543 = 2,162 \text{ cm}^3$$

Proporção da mistura em volume conforme manual técnico da resina (anexo

A)

Araldite LY 1564: 100 = 66,67%

Aradur 2963: 50 = 33,33%

$$V_{araldite} = 2,162 \cdot 0,6667 = 1,441 \text{ cm}^3$$

$$V_{aradur} = 2,162 \cdot 0,3333 = 0,720 \text{ cm}^3$$

Densidade conforme manual técnico da resina (anexo A) e da fibra (anexo

B)

Araldite LY 1564: 1,15 g/cm<sup>3</sup>

Aradur 2963: 1,00 g/cm<sup>3</sup>

Fibra Advantex E-CR GLASS: 2,62 g/cm<sup>3</sup>

$$D = \frac{m}{V}; \quad m = D \cdot V$$

$$m_{araldite} = 1,15 \cdot 1,441 = 1,65 \text{ g}$$

$$m_{aradur} = 1,00 \cdot 0,720 = 0,72 \text{ g}$$

$$m_{fibra} = 2,62 \cdot 1,543 = 4,04 \text{ g}$$

### APÊNDICE C

#### Classificação das peças de madeira utilizadas no ensaio à tração da emenda

Ensaio Realizado no: Lab. Estruturas-UJEL										Quadro de Classificação das Tábuas de Madeira <i>Pinus spp</i> utilizadas no Ensaio à Tração das Emendas												
Dados Gerais:										Norma Utilizada: 7190/2010												
Data: 15/06/2018 Manual Utilizado: MOURA et al., 2012										Data: 20/07/2018 Norma Utilizada: 7190/2010												
Tábua	Dimensões (cm)			Peso (Kg)	U** (%)	δ (Kg/cm³)	δ (g/cm³)	Nº Anéis	Nº Nós	Defeitos	Classificação	Classificação Mecânica Estática- Ensaio à Flexão					Classificação Mecânica Dinâmica- Ultrassom					
	b	h	l									F <sub>m, 50%</sub> (Kg)	F <sub>m, 10%</sub> (Kg)	V <sub>10%</sub> (cm)	I (cm⁴)	E <sub>m, flexão</sub> (Kg/cm²)	E <sub>m, flexão</sub> (MPa)	E <sub>o</sub> (MPa)	L (µs)	V (m/s)	δ (Kg/m²)	E <sub>m, oqi</sub> (MPa)
L01	14,86	2,13	300,0	4,03	9,6	0,000424	0,423742	8	2		Nº 2	39	2,488	12,03	46920,52	4692,05	5520,06	505,7	5932	423,7422191	14910,91	17542,24
L02	14,86	2,13	300,0	4,03	9,6	0,000424	0,423742	11	3		Nº 3	40	2,71	12,03	44181,38	4418,14	5197,81	546,2	5822	423,7422191	12920,95	15201,12
L03	14,85	1,97	300,1	4,13	10	0,00047	0,470086	10	2		Nº 3	34	2,155	9,48	59888,31	5988,83	7045,68	512,6	5852	470,0864448	16098,54	18939,45
L04	14,85	1,97	300,1	4,13	10	0,00047	0,470086	10	3		Nº 3	33,3	2,64	9,48	47879,62	4787,96	5632,9	545,3	5501	470,0864448	14225,29	16735,63
L05	14,97	2,17	300,2	5,675	11,5	0,000583	0,582524	11	4		Nº 3	28,6	1,489	12,71	54382,80	5438,28	6397,98	683,9	4386	582,5238593	11206,01	13183,54
L06	14,97	2,17	300,2	5,675	11,5	0,000583	0,582524	20	1		Nº 2	31,6	1,09	12,71	82082,54	8208,25	9656,77	525,7	5706	582,5238593	18966,07	22313,02
L07	14,96	1,93	300,4	4,13	9,9	0,000476	0,476448	7	4		Nº 3	31	2,569	8,94	48582,79	4858,28	5715,62	432	6944	476,447967	22973,91	27028,13
L08	14,96	1,93	300,4	4,13	9,9	0,000476	0,476448	10	6		Nº 3	31	3,089	8,94	40404,40	4040,44	4753,46	624,2	4806	476,447967	11004,82	12946,85
L09	14,60	1,94	300,0	4,155	9	0,000488	0,488436	16	10		Nº 3	29,6	2,3	8,92	51952,80	5195,28	6112,09	532,4	5634	488,4360521	15503,92	18239,90
L10	14,60	1,94	300,0	4,155	9	0,000488	0,488436	17	6		Nº 2	34,3	2,884	8,92	48011,36	4801,14	5648,39	580,4	5168	488,4360521	13045,26	15347,36
L11	14,72	1,99	300,0	5,6	14,6	0,000637	0,637461	14	5		Nº 3	33,1	1,74	9,66	70866,83	7086,68	8337,27	498,1	6022	637,4607208	23117,18	27196,69
L12	14,72	1,99	300,0	5,6	14,6	0,000637	0,637461	17	4		Nº 3	32,4	1,79	9,66	67430,48	6743,05	7933	477,5	6282	637,4607208	25156,45	29595,82
L13	14,53	2,08	297,0	4,51	12	0,000501	0,501375	12	4		Nº 1	33	2,164	10,97	50050,66	5005,07	5888,31	525,8	5705	501,3750204	16318,27	19197,96
L14	14,53	2,08	297,0	4,51	12	0,000501	0,501375	16	5		Nº 2	32,4	2,377	10,97	44737,21	4473,72	5263,2	513,4	5843	501,3750204	17117,27	20137,96
L15	14,70	1,98	299,0	4,655	11	0,000534	0,534489	16	5		Nº 2	33	1,944	9,53	64153,79	6415,38	7547,51	548,6	5468	534,4885091	15980,68	18800,81
L16	14,70	1,98	299,0	4,655	11	0,000534	0,534489	15	8		Nº 3	27,4	1,675	9,53	61821,63	6182,16	7273,13	524	5725	534,4885091	17518,19	20609,64
L17	14,45	1,92	299,0	5,135	13	0,000619	0,618907	16	2		Nº 3	27,7	1,348	8,52	86781,46	8678,15	10209,6	474,2	6326	618,9065128	24767,57	29138,32
L18	14,45	1,92	299,0	5,135	13	0,000619	0,618907	14	2		Nº 3	26	1,364	8,52	80500,03	8050,00	9470,59	486,6	6165	618,9065128	23522,92	27674,02
L19	14,57	2,00	300,0	4,905	9,6	0,000562	0,561894	18	7		Nº 3	26,4	1,319	9,68	74461,80	7446,18	8760,21	482	6224	561,8940437	21766,75	25607,94
L20	14,57	2,00	300,0	4,905	9,6	0,000562	0,561894	12	3		Nº 2	25,7	1,653	9,68	57840,85	5784,08	6804,81	546,4	5490	561,8940437	16935,54	19924,17
L21	14,67	1,81	300,0	4,095	12	0,000515	0,515222	15	14		Nº 3	28,4	2,654	7,20	53496,79	5349,68	6293,74	531,4	5645	515,2223092	16418,09	19315,40
L22	14,67	1,81	300,0	4,095	12	0,000515	0,515222	16	6		Nº 1	28	2,207	7,20	63425,80	6342,58	7461,86	569,3	6392	515,2223092	21050,78	24765,62
L23	14,54	1,91	300,0	5,08	11	0,000609	0,608891	18	4	7mm encanoamento	Nº 3	27,7	1,375	8,48	85571,86	8557,19	10067,3	482,5	6217	608,8913296	23534,31	27687,43
L24	14,54	1,91	300,0	5,08	11	0,000609	0,608891	14	2	7mm encanoamento	Nº 3	28,1	1,549	8,48	77056,41	7705,64	9065,46	528,3	5678	608,8913296	19630,46	23094,66
L25	14,39	1,95	300,9	5,53	13	0,000656	0,656223	10	1		Nº 1	20	0,587	8,84	136688,57	13668,86	16316,3	558,7	5369	656,2225799	18916,38	22254,56
L26	14,39	1,95	300,9	5,53	13	0,000656	0,656223	7	1		Nº 1	20	0,956	8,84	85157,11	8515,71	10018,5	561,8	5339	656,2225799	18705,57	22006,56

## APÊNDICE D

A seguir será exposto o cálculo realizado para a definição do diâmetro da cavilha de compósito estrutural utilizado no ensaio à tração do modelo com ligações cavilhadas.

Dados do ensaio:

$$\varepsilon_1 = 0,00228 \text{ mm (deformação longitudinal)}$$

$$\varepsilon_2 = 0,000444 \text{ mm (deformação transversal)}$$

$$\sigma = 140 \text{ MPa}$$

Cálculo do coeficiente de Poisson

$$v = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

$$v = \frac{0,000444}{0,00228} = 0,195 \text{ mm}$$

Cálculo do módulo de elasticidade longitudinal

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1}$$

$$E = \frac{140}{0,00228} = 61403,5 \text{ MPa}$$

Cálculo do módulo de elasticidade de cisalhamento

$$G = \frac{E}{2(1 + v)}$$

$$G = \frac{61403,5}{2(1 + 0,195)} = 25691,84 \text{ MPa}$$

Cálculo da resistência ao cisalhamento

$$G = \frac{\tau}{\varepsilon_2}$$

$$25691,84 = \frac{\tau}{0,000444}$$

$$\tau = 14,407 \text{ MPa}$$

Cálculo do diâmetro da cavilha

$$F = \frac{33840}{9} \text{ (Resistência da Ligação (RECCO, 2015))}$$

( número de pregos)

$$F = 3760 \text{ N}$$

$$F = \frac{3760}{2} = 1880 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{\pi d^2/4}$$

$$14,407 = \frac{1880}{\pi d^2/4}$$

$$d = 12,88 \text{ mm}$$

**ANEXOS**

## ANEXO A

### Manual técnico do Adesivo Epóxi Araldite Ly 1564BR e do Endurecedor Aradur 2963 (2005)

Advanced Materials

DCE- Design & Composites Engineering

**HUNTSMAN**

---

## Araldite® LY 1564 BR

---

Resina epóxi , de baixa viscosidade, de cura a temperatura ambiente e a calor, utilizada para laminação e impregnação.

---

Aplicações /  
Processo

O Araldite LY 1564 em combinação com os Endurecedores de cura ARADUR, foi desenvolvido para a produção de laminados técnicos e compostos de alta performance, quando combinados com Fibras de :  
Vidro ; Carbono ; Aramida.

Laminados deste tipo podem ser usados na produção de peças técnicas nos mais variados campos como por exemplo nos equipamentos esportivos como raquete de tenis, skis, jet-skis, carrocerias automotivas , barcos, aviões, tubos , tanques , banheiras, pias, reforço de estruturas na construção civil.

Laminação manual ( hand-lay-up)  
Filament Winding  
Pultrusão  
Infusão ( injeção a vácuo)  
RTM  
Etc.

---

Propriedades

Devido ser um produto mais estruturado internamente, promove ligações internas fortes ( high cross-link) , tendo como resultado uma melhor resistência mecânica , química e térmica, bem como um produto com maior resistência a fadiga ( stress ).

---

Características

A alta capacidade de umectação e a excelente aderência ao substrato, conferem aos laminados produzidos com Araldite LY 1564, ótimas resistências. Recomenda-se utilizar Fios ou Tecido de Vidro, com tratamento ( finishing) para uso com Resina Epóxi.

Os dados abaixo são orientativos não representando nossa especificação

### Propriedades dos Componentes

	<b>Araldite LY 1564 BR</b>	<b>Endurecedor ARADUR 2954</b>	<b>Endurecedor ARADUR 2963</b>
Aspecto	Líquido claro até amarelado	Líquido claro	Líquido limpido claro
Viscosidade à 25°C (mPas)	1200 - 1400	70 - 120	30 - 70
Índice de Cor Gardner	1 - 2	< 2	< 2
Densidade g/cm <sup>3</sup>	1,10 - 1,20	0,94 – 0,95	1,00

### Proporção de Mistura

#### Proporção da mistura em gramas

Araldite LY 1564	100	100
Aradur 2954	35	-
Aradur 2963	-	48

#### Proporção da mistura em volume

Araldite LY 1564	100	100
Aradur 2954	42	-
Aradur 2963	-	50

A Resina e o Endurecedor devem ser pesados separadamente, e misturados até perfeita homogeneização. Para grandes quantidades de mistura o Pot Life diminuirá em função da massa e da reação exotérmica.

### Viscosidade da Mistura Resina / Endurecedor

	<b>LY 1564 BR / 2954</b>	<b>LY 1564 BR / 2963</b>
Viscosidade da mistura à 25 °C (mPas)	500 - 700	300 - 400

### Tempo de Uso da Mistura à 25 °C

	<b>LY 1564 BR / 2954</b>	<b>LY 1564 BR / 2963</b>
POT LIFE p/ 100gr	480 - 600 min	~ 35 min

No trabalho com grandes quantidades bem como nas temperaturas acima de 25 °C , o tempo de utilização será reduzido, recomenda-se então distribuir o produto rapidamente e reduzir as quantidades de mistura.

Propriedades  
Mecânicas em  
condições especiais  
de cura  
(endurecimento)

**Araldite LY 1564 com Endurecedor :**

<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>	<b>ARADUR 2954</b>	<b>ARADUR 2963</b>
Resistência à <b>Tração</b> Cura 24h 25°C+ 8h a 60°C Cura 7 dias a 25°C	Kg/mm <sup>2</sup> <b>Kg/mm<sup>2</sup></b>	6,63 ----- -----	----- <b>5,73</b>
Resistência à <b>Tração</b> Cura 15 dias ambiente	Kg/mm <sup>2</sup>	6,50	-----
Resistência à <b>Flexão</b> Cura 24h25°C+ 8h a 60°C Cura a 7 dias a 25°C	Kg/mm <sup>2</sup> Kg/mm <sup>2</sup>	12,30 -----	----- <b>9,73</b>
Resistência à <b>Flexão</b> Cura 15 dias a 25°C	Kg/mm <sup>2</sup>	10,64	-----
Resistência à <b>Compressão</b> Cura 7 dias a 25°C	----- Kg/mm <sup>2</sup>	----- -----	----- <b>7,92</b>
Absorção de água 10 dias à 20 °C 1 h água fervente 1 dia água destilada a 25°C 7 dias água destilada a 25°C	% de peso % de peso % de peso % de peso	0,23 0,20 ASTM D 570 ASTM D 570	----- ----- 0,18 0,53

**Propriedades térmicas do Araldite LY 1564 :**

- a-) Quando utilizado com o Aradur 2963 , apresenta Tg de 41°C, curado a 25°C por 24 hs.  
b-) Quando utilizado com o Aradur 2954, apresenta Tg de 80°C, curado a 4 hs/80°C  
obs. O nível de Tg pode ser melhorado dependendo das condições de cura do sistema.

---

**Armazenamento** Resina e Endurecedor devem ser armazenados em um ambiente seco de 18 à 25°C, preferivelmente nas embalagens originais . O tempo de utilização deve ser observado no rótulo do produto.

---

**Importante** As informações contidas neste folheto são dados orientativos e não representam nossa especificação, portanto não podem ser utilizados como parâmetro de aprovação ou controle de qualidade para nossos produtos.

"Os nomes **Araldite e Aradur** são marcas registradas de propriedade e uso licenciado para HUNTSMAN, e suas afiliadas"

Estas informações são baseadas no estágio atual dos nossos conhecimentos. Quaisquer conclusões ou recomendações são, porém, feitas sem responsabilidade da nossa parte. Compradores e usuários devem fazer a sua própria avaliação dos nossos produtos, levando em consideração as condições e as exigências adequadas. Em caso de dúvida solicitamos que entrem em contato através dos endereços abaixo.

---

**HUNTSMAN Advanced Materials**  
**Química Brasil Ltda**

Av. Prof. Vicente Rao, nº 90 - Brooklin  
Cep 04706-900 - São Paulo - Brasil  
Fone: +55-11- 5532 7340  
Fax : +55-11- 5543-6386  
<http://www.huntsman.com>

## ANEXO B

Manual técnico da Fibra de vidro Advantex E-CR GLASS (2011)

<b>Glass Property Summary</b>								
PROPERTY	TEST METHOD	UNIT	E-GLASS	ADVANTEXTM E-CR GLASS	OCV <sup>TM</sup> H-GLASS	OCV <sup>TM</sup> R-GLASS	OCV <sup>TM</sup> S-GLASS	OCV <sup>TM</sup> AR-GLASS
<b>FIBER AND BULK GLASS PROPERTIES</b>								
Density	ASTM C693	g/cm <sup>3</sup>	2.55-2.58	2.62	2.61	2.55	2.45	2.68
Refractive Index (bulk annealed)	ASTM C1648	-	1.547-1.562	1.565	1.566	1.54	1.522	1.562
Conductivity	ASTM C177	watts/m•K	1.0-1.3	1.22	/	/	1.34	/
Pristine Fiber Tensile Strength	ASTM D2101	MPa	3450-3790	3750	4130	4510	4955	3700
Specific Pristine Strength	Calculation	x 10 <sup>5</sup> m	1.36-1.50	1.46	1.58	1.83	2.06	1.38
Young's Modulus		GPa	69-72	81	87.5	87	88	77
Specific Modulus	Calculation	x 10 <sup>6</sup> m	2.73-2.85	3.15	3.33	3.48	3.67	2.85
Elongation at Break		%	4.8	4.9	4.9	5.35	5.5	/
<b>THERMAL PROPERTIES</b>								
Coefficient of Thermal Expansion, 23-300 °C	ASTM D696	x 10 <sup>-6</sup> cm/cm•°C	5.4	6	5.3	4.1	3.4	/
Specific Heat @ 23 °C	ASTM C832	kJ/kg•K	0.807	0.79	/	0.75	0.810	/
<b>FIBER TENSILE STRENGTH VS. TEMPERATURE</b>								
Pristine Fiber Tensile Strength, -196 °C	ASTM D2101	MPa	5310	5935	/	7220	7826	/
Pristine Fiber Tensile Strength, 22 °C	ASTM D2101	MPa	3450-3790	3751	4130	4478	5047	/
<b>FIBER WEIGHT LOSS @ 96 °C, 24 HOURS, 17 μM FIBER</b>								
10% HCl		%	31.7	7.9	7.6	6.2	1.5	/
1.5 10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		%	32.0	6.9	6.5	5.1	1.2	/

## Glass Property Summary

PROPERTY	TEST METHOD	UNIT	E-GLASS	ADVANTEK <sup>®</sup> E-CR GLASS	OCV <sup>™</sup> H-GLASS	OCV <sup>™</sup> R-GLASS	OCV <sup>™</sup> S-GLASS	OCV <sup>™</sup> AR-GLASS
<b>FIBER WEIGHT LOSS @ 96 °C, 24 HOURS, 17 μM FIBER</b>								
1 N Nitric		%	23.5	7.2	6.7	5.2	1.4	/
NaOH pH=12.88		%	5.4	3.2	12.6	/	19.3	/
<b>FIBER WEIGHT LOSS @ 50°C, 1000 HOURS, 19 μM FIBER</b>								
2M HCl	EN 175	%	/	/	/	/	/	< 1
2M NaOH	EN 175	%	/	/	/	/	/	< 0.2
<b>IMPREGNATED STRAND PROPERTIES</b>								
Tensile Strength	ASTM D2343	MPa	2000-2500	2200-2600	2400 -2900	3050-3400	3410-3830	/
	EN 9163	MPa	/	/	/	/	/	2160
Tensile Modulus	ASTM D2343	GPa	78-80	81	90	90	91.3	/
	EN 9163	GPa	/	/	/	/	/	74
Toughness	ASTM D2343	MPa	37	56	/	69	Sep-82	/
<b>UNIDIRECTIONAL COMPOSITE PROPERTIES<sup>1, 2</sup></b>								
Tensile Strength	ISO 527-5	MPa	1120	1200	1260	1560	1550	940
Tensile Modulus	ISO 527-5	GPa	46	48	52.5	51.6	53	41
Poisson's Ratio	ASTM D638	-	0.29	0.33	0.33	0.32	0.27	/
Fiber Volume Fraction	ASTM D2734	%	60	60	60	60	60	50

1. Hexion MGS RIM 135 epoxy resin + RIMH 137 hardener
2. In AR-Glass, Derakane vinyl ester resin has been used

## ANEXO C

Tabela resumida dos defeitos admissíveis em cada classe (MOURA et al., 2012)

CONDIÇÕES PARA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA TIPO PINUS				
DEFEITOS	CLASSES	Nº 1	Nº 2	Nº 3
Encurvamento (Bow)	EE	Até 1% do comprimento da peça	Até 1,5% do comprimento da peça	Até 2% do comprimento da peça
Encurvamento Complexo (Complex Bow)	X	X	X	X
Torcimento (Twist)	X	X	X	X
Arqueamento (Spring)	X	Até 10% da espessura da peça	Até 10% da espessura da peça	Até 20% da espessura da peça
Encanoamento (Cup)	X	Para largura > 8,9 cm: admissível 1% da largura da peça (*)	Para largura > 8,9 cm: admissível 1,5% da largura da peça (*)	Para largura > 6,4 cm: admissível 2,5% da largura da peça (*)
Esmoado (wane)	15%, 3%, 20% (*)	15%, 5%, 20% (*)	30%, 10%, 30% (*)	30%, 20%, 40% (*)
Rachaduras (Split)	60 cm mesmal largura da peça (*)	60 cm; mesma largura da peça (*)	90 cm ou 1/4 do comprimento da peça; mesma largura da peça (*)	116 do comprimento da peça; sem limitações se atravessar a largura da peça (*)
Bolsa de Resina (Resin Pocket)	X	5%, 25% (*)	10%, sem restrições (*)	15%, sem restrições (*)
Medula (Pith)	X	1/4 da espessura da peça	Sem restrições	Sem restrições
Furo de Insetos (Insect Holes)	X	X	X	X
Galeria (Grub Hole)	X	X	X	X
Grã Entrecruzada (Interlocked Grain)	8% (*)	10% (*)	12,5% (*)	25% (*)
Madeira Ardida (Incipient Decay)	X	X	X	X
Mancha Azul / Quimica (Blue / Chemical Stain)	X	10% (*)	25% (*)	50% (*)
Nó Cariado (Unsound Knot)	X	X	1/3 (*)	1/2 (*)
Nó Gravata (Spike Knot)	X	X	1/3 (*)	1/2 (*)
Nó de Quina (Corner Knot)	X	1/4 (*)	1/3 (*)	1/2 (*)
Nó Firme (Tight Knot)	1/6 (*)	1/4 (*)	1/3 (*)	1/2 (*)
Nó Solto (Loose Knot)	X	X	1/3 (*)	1/2 (*)
Nó Vazado (Knot Hole)	X	X	1/3 (*)	1/2 (*)
Nó Espora (Pin Knot)	1/6 (*)	1/4 (*)	1/3 (*)	1/2 (*)

X Não admissíveis

(\*) Não admissível em peças com largura até 8,9 cm nas classes 1 e 2, e 6,4 cm na classe 3.

(\*\*) Limites de percentual do esmoado em relação à espessura, largura e comprimento da peça, respectivamente.

(\*) Limites das rachas em relação ao comprimento e largura da peça, respectivamente.

(\*) Percentual máximo permitido da bolsa de resina em relação à largura e comprimento da peça, respectivamente.

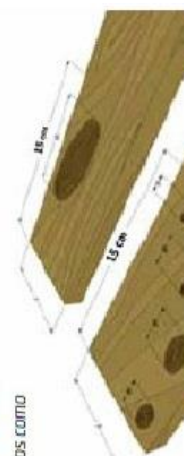
(\*) Percentual máximo permitido para a inclinação da grã.

(\*) Percentual máximo permitido da área da peça com mancha azul ou química.

(\*) Limites para os diâmetros dos nós na largura da seção transversal, conforme figura ao lado.

\*Obs.: O limite do diâmetro dos nós é calculado através da soma dos nós presentes a cada 1,5 cm de comprimento considerando-os como um grupo de nós.

**Nota:** Não é permitida nas Classes nº. 1 e nº. 2, qualquer peça que contenha mais que seis e sete tipos de defeitos descritos, respectivamente. Mesmo que estes ocorram dentro dos limites estabelecidos.



ANEXO D

Detalhamento do Aparato (RECCO, 2015)

DETALHAMENTO PEÇAS METÁLICAS APARATO

