



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

JOSÉ CARLOS REHME

**O DESEMPENHO DAS LIGAÇÕES DE MADEIRA
CONFECCIONADAS COM CAVILHAS DE COMPÓSITO
POLIMÉRICO:
MATRIZ DE RESINA EPÓXI E REFORÇADAS COM FIBRA
DE VIDRO**

JOSÉ CARLOS REHME

**O DESEMPENHO DAS LIGAÇÕES DE MADEIRA
CONFECCIONADAS COM CAVILHAS DE COMPÓSITO
POLIMÉRICO:
MATRIZ DE RESINA EPÓXI E REFORÇADAS COM FIBRA
DE VIDRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa Associado de Pós-graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo das Universidades Estaduais de Londrina e Maringá para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura

Londrina
2019

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

Rehme, José Carlos.

O desempenho das ligações de madeira confeccionadas com cavilhas de compósito polimérico: matriz de resina epóxi e reforçadas com fibra de vidro / José Carlos Rehme. - Londrina, 2019.
121 f. : il.

Orientador: Jorge Daniel de Melo Moura.

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

Inclui bibliografia.

1. Resina epóxi - Tese. 2. Compósitos - Tese. 3. Ligações de madeira - Tese. 4. Cavilhas - Tese. I. Moura, Jorge Daniel de Melo . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

JOSÉ CARLOS REHME

**O DESEMPENHO DAS LIGAÇÕES DE MADEIRA
CONFECCIONADAS COM CAVILHAS DE COMPÓSITO
POLIMÉRICO:**

MATRIZ DE RESINA EPÓXI E REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa Associado de Pós-graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo das Universidades Estaduais de Londrina e Maringá para obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo
Moura

Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Ricardo Dias Silva

Universidade Estadual de Maringá - UEM

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo - USP

Londrina, 18 de junho de 2019.

AGRADECIMENTO

Agradeço inicialmente à Deus, por me conduzir neste caminho do saber e por me conceder a graça da perseverança para superar os diversos desafios.

Agradeço à minha família, pelo apoio, compreensão e paciência.

Ao meu orientador, por acreditar e incentivar na execução desta pesquisa, e aos demais professores do Programa de Pós-graduação, pelo profissionalismo ao ministrar os diversos conteúdos.

À estagiária de iniciação científica, Srta. Caroliny Borges Lecia, que esteve presente em todos os momentos para a preparação dos materiais.

Ao Sistema FIEP, através das unidades do SENAI de Araçongas e de Maringá que cederam suas estruturas laboratoriais para a elaboração dos corpos de prova e respectivos ensaios, necessários à pesquisa.

Ao amigo Jorge Massato Kawasaki, que dedicou tempo e conhecimento.

A Srta. Isadora Nogueira, não medindo esforços e nem hora para colaborar.

Agradeço também às empresas: ADEX – Tintas Industriais com sede em Araçongas, que cedeu as primeiras amostras da resina Epóxi; à empresa Owens Corning OC Brasil em disponibilizar a fibra de vidro que foi utilizada no compósito; à empresa CIBERPLAST fornecendo os cartuchos utilizados como protótipos para inserção do compósito nas matrizes; e à empresa SILAEX, através do Sr. Clóvis Sakamoto, que nos orientou no manuseio da resina epóxi.

Ao Sr. Carlos Alberto Duarte, técnico da maquetaria da Universidade Estadual de Londrina - UEL, sempre disposto a auxiliar no uso dos materiais e dos instrumentos do laboratório.

Por fim, agradeço aos demais colegas matriculados no programa, com os quais convivi e aprendi nas diversas disciplinas - em especial à Srta. Amanda Ceinoti de Almeida e Sra. Laisa Barcarolo, pois juntos compartilhamos conhecimento sobre o uso da resina epóxi.

REHME, José Carlos. **O desempenho das ligações de madeira confeccionadas com cavilhas de compósito polimérico**: matriz de resina epóxi e reforçado com fibra de vidro. 2019. 121 p. Dissertação (Mestrado em Metodologia de Projeto) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

RESUMO

A madeira sempre foi utilizada como elemento construtivo em diversos projetos ao longo da história da humanidade e, por ser uma fonte de recurso renovável, desperta cada vez mais o interesse pelo seu uso. Possuindo nas suas dimensões um limitador, há necessidade de elaboração das ligações, visando ampliar seu comprimento ou ainda conformar a estrutura para sustentação ou modelagem do produto desejado. As ligações nas estruturas consistem em uma região de menor resistência, sujeita a deformações com a incidência de cargas. Assim, é oportuno e necessário o estudo dessas ligações, seja dos componentes de ligação convencionais, como na inserção de novos materiais e técnicas. O centro desta pesquisa está em estudar a confecção de ligações com cavilhas em compósito polimérico, de resina epóxi e fibra de vidro, ao ponto de promover, no mínimo, a mesma resistência e rigidez das estruturas tradicionais, com cavilha em madeira. Trabalhar com os compósitos poliméricos no setor que atua com estruturas de madeira é promover e complementar uma nova discussão, elevando o nível de conhecimento, extrapolando a prática instituída há anos, propondo alternativas capazes de serem reproduzidas em escala industrial; bem como, ser uma alternativa a própria escassez de algumas madeiras. Obteve – se como resultado um material com potencial para atender ao objetivo desejado, mas que ainda precisa ser aprimorado, decorrente de algumas novas variáveis, como: sistema de inserção do compósito na matriz de conformação que garanta o sentido de orientação das fibras, pressão de compactação deste no interior da matriz, a análise macroscópica da estrutura e da cinética de cura do compósito.

Palavras-chave: Resina epóxi. Compósitos. Ligações de madeira. Cavilhas.

REHME, José Carlos. **Performance of wooden connections made with polymeric composite heads:** epoxy resin matrix and strengthened with glass fiber. 2019. 121 p. Dissertação (Mestrado em Metodologia de Projeto) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

ABSTRACT

Wood has always been used as a building element in various projects throughout the history of mankind and, as a source of renewable resources, is increasingly arousing interest in its use. Having in its dimensions a limiter, it is necessary to elaborate the connections, aiming to extend its length or to conform the structure to support or modeling the desired product. The joints in the structures consist of a region of lower resistance, subject to deformations with the incidence of loads. Thus, it is timely and necessary to study these bonds, either from conventional bonding components, or in the insertion of new materials and techniques. The focus of this research is to study the making of connections with epoxy resin and fiberglass polymer composite dowels, to the point of promoting at least the same strength and stiffness as traditional wooden dowel structures. Working with polymer composites in the woodworking sector is to promote and complement a new discussion, raising the level of knowledge, extrapolating the practice established for years, proposing alternatives that can be reproduced on an industrial scale; as well as being an alternative to the very shortage of some woods. The result was a material with potential to meet the desired objective, but still needs to be improved, due to some new variables, such as: insertion system of the composite in the conformation matrix that guarantees the direction of fiber orientation, pressure of its compaction within the matrix, macroscopic analysis of the structure and cure kinetics of the composite.

Key words: Epoxy resin. Composites. Wood connections. Bolts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Secção tangencial ampliada do tecido celular de árvore conífera	22
Figura 2 -	Hierarchical structure of wood: concentric growth rings (left), honeycomb structure of wood cell (middle), fiber composite structure of cell wall (right)”	23
Figura 3 -	Anisotropia da madeira. São indicadas as direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T)	24
Figura 4 -	Manual para classificação da madeira – nós	25
Figura 5 -	Manual para classificação da madeira – defeitos.....	26
Figura 6 -	Deformação específica ou residual	27
Figura 7 -	Diagrama tensão - deformação específica para determinação da rigidez.....	29
Figura 8 -	Formas de transmissão de esforços nas ligações de estruturas de madeira	30
Figura 9 -	Representação das ligações com uma seção de corte; à esquerda com pino rígido e à direita com pino flexível	31
Figura 10 -	Representação de ligação Ookkakedaisentsugi, na arquitetura e engenharia japonesa	31
Figura 11 -	Representação de ligação Komi-sen, na arquitetura e engenharia japonesa.....	31
Figura 12 -	Ligação com cavilha no sótão do Tabernáculo de Salt Lake	32
Figura 13 -	Ligação com cavilha em Galpão para armazenagem de produtos químicos em São Paulo (Brasil)	32
Figura 14 -	Ligação com pino metálico (pregos) em Galpão para armazenagem de produtos químicos em São Paulo (Brasil)	32
Figura 15 -	Ligação com cavilha em estrutura de mobiliário	33
Figura 16 -	Diagrama força - deformação específica da ligação	33
Figura 17 -	Ligação de cavilha em corte duplo – representando a espessura ‘t’	35
Figura 18 -	Tipos de forma molecular dos polímeros	37
Figura 19 -	Padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra que está sujeita à aplicação de uma carga de tração	40

Figura 20 - Estágios de cura da resina epoxídica: a) Etapa de Indução; b – c) Etapa de Gelificação; e - d) Etapa de Vitificação	41
Figura 21 - Ensaio da fase 1	47
Figura 22 - Esboço de análise do gráfico para coleta de dados e cálculo da resistência e do módulo de elasticidade.....	47
Figura 23 - Elaboração de cavilhas com percentuais variados de resina flexível (10%, 30%, 50% e 70 %)	49
Figura 24 - Ensaio da fase 2 - Normal às fibras, com cavilhas de madeira e de compósito	49
Figura 25 - Ensaio da fase 2 – Paralelo às fibras com cavilhas de madeira e de compósito.....	50
Figura 26 - Madeira de Jatobá utilizada para confeccionar cavilhas para ensaio da fase 1	50
Figura 27 - Cavilhas de Jatobá para ensaio da fase 1	50
Figura 28 - Tipos diferentes de madeira testados para elaboração das cavilhas da fase 2	51
Figura 29 - Técnica de tornear para obter as cavilhas de madeira.....	53
Figura 30 - Peças torneadas para conformação das cavilhas apresentando fedilhamento.....	53
Figura 31 - Matriz para confecção das cavilhas de madeira	54
Figura 32 - Retifica da matriz para extrusão das cavilhas de madeira	54
Figura 33 - Etapas do processo de conformação das cavilhas	55
Figura 34 - Corpo de prova fase 1	55
Figura 35 - Corpo de prova fase 2 – ensaio paralelo às fibras	56
Figura 36 - Corpo de prova fase 2 - ensaio normal às fibras.....	56
Figura 37 - Parte da madeira de um lote utilizada para elaboração dos corpos de prova	57
Figura 38 - Parte das madeiras desclassificadas durante processo de usinagem.....	57
Figura 39 - Madeiras desclassificadas durante processo por ultrassom e visual	57
Figura 40 - Peça para corpo de prova fase 1	58
Figura 41 - Peça 'A' para compor corpo de prova de ensaio normal às fibras	58

Figura 42 - Peça 'B' para compor corpo de prova do ensaio normal e paralelo às fibras	58
Figura 43 - Peça 'C' para compor corpo de prova para ensaio paralelo às fibras	59
Figura 44 - Aparelho para medir percentual de umidade das madeiras utilizadas, nas diversas etapas da pesquisa	60
Figura 45 - Aparelho de Ultrassom AGRICEF USLab.....	60
Figura 46 - Classificação das madeiras para confecção dos corpos de prova com auxílio do aparelho de Ultrassom	60
Figura 47 - Laboratório da Universidade Estadual de Londrina (UEL)	66
Figura 48 - Laboratório da unidade do SENAI em Araçongas	66
Figura 49 - Pesagem dos componentes em balança de precisão	66
Figura 50 - Processo de elaboração das cavilhas de compósito.....	67
Figura 51 - Compósito preparado, sendo inserido na matriz com auxílio de funil.....	67
Figura 52 - Ciclo de cura das cavilhas de compósito	68
Figura 53 - Processo de retirar as cavilhas de compósito das matrizes.....	68
Figura 54 - Conjunto de cavilhas elaboradas para ensaios, estando algumas já fora das matrizes	68
Figura 55 - Conferencia das dimensões das cavilhas após a cura.....	69
Figura 56 - Simulação do processo de retífica das cavilhas de compósito	69
Figura 57 - Característica inicial da mangueira, gerando peças levemente curvas.....	70
Figura 58 - Processo de tornar matrizes retas	70
Figura 59 - Mangueira plástica para elaboração das matrizes para elaboração das cavilhas.....	71
Figura 60 - Espaçadores de aço para evitar o engrenamento entre as peças.....	71
Figura 61 - Montagem do corpo de prova normal às fibras, com cavilhas de madeira, inserindo estas através dos dois lados e com uso dos separadores	72
Figura 62 - Montagem do corpo de prova paralelo às fibras, com cavilhas de madeira, inserindo estas através dos dois lados e com uso dos separadores	72

Figura 63 -	Corpos de prova descartados ao apresentarem defeitos.....	72
Figura 64 -	Usinagem do aparelho de carregamento utilizado na fase 1 de ensaios.....	74
Figura 65 -	Aplicação do aparelho de carregamento utilizado na fase 1 de ensaios.....	74
Figura 66 -	Bases metálicas elaboradas para dar sustentação ao corpo de prova.	75
Figura 67 -	Local de utilização das bases metálicas	65
Figura 68 -	Máquina Universal de ensaios DL 10000 e célula de carga 100 kN – Laboratório SENAI em Arapongas / PR.....	77
Figura 69 -	Máquina Universal de ensaios DL 30000 e célula de carga 300 kN – Laboratório SENAI em Maringá / PR	78
Figura 70 -	Corpo de prova com cavilha de compósito – normal às fibras	84
Figura 71 -	Corpo de prova com cavilha de madeira – normal às fibras	85
Figura 72 -	Corpo de prova com cavilha de compósito – paralelo às fibras	86
Figura 73 -	Corpo de prova com cavilha de madeira – paralelo às fibras.....	87
Figura 74 -	Corpos de prova paralelo às fibras com cavilhas de madeira	93
Figura 75 -	Corpos de prova paralelo às fibras com cavilhas de compósito.....	93
Figura 76 -	Demonstração em corte longitudinal da cavilha de madeira e seus locais de ruptura, quando sujeita à aplicação de uma determinada carga	94
Figura 77 -	Demonstração em corte longitudinal da cavilha de compósito e seus locais de ruptura, quando sujeita à aplicação de uma determinada carga	94
Figura 78 -	Secção de rompimento da cavilha de madeira	94
Figura 79 -	Representação da secção transversal da ruptura da cavilha de compósito.....	95
Figura 80 -	Esquema de como transferir o compósito do funil para o corpo de prova	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores médios de referência obtidos durante ensaio não destrutivo de Ultrassom, no universo de peças elaboradas, passíveis de utilização para confecção dos corpos de prova do fase 2	63
Tabela 2 –	Rastreabilidade da amostra dos corpos de prova normal às fibras com cavilhas de compósito	75
Tabela 3 –	Rastreabilidade da amostra dos corpos de prova normal às fibras com cavilhas de madeira	75
Tabela 4 –	Rastreabilidade da amostra dos corpos de prova paralelo às fibras com cavilhas de compósito	76
Tabela 5 –	Rastreabilidade da amostra dos corpos de prova paralelo às fibras com cavilhas de madeira	76
Tabela 6 –	Resultado médio de corpos de prova com cavilhas de madeira e de compósito Fase 1	82
Tabela 7 –	Resultado médio comparativo da resistência da cavilha (fase 2 de ensaios) com os pinos metálicos – Elaborado por RECCO (2014).	83
Tabela 8 –	Resultado médio de corpos de prova – Fase 1 – Teste com percentual variado de resina flexível.....	84
Tabela 9 –	Resultado de ensaio da fase 2 – corpo de prova com cavilha de compósito, normal às fibras (CN).....	86
Tabela 10 –	Resultado de ensaio da fase 2 – corpo de prova com cavilha de madeira, normal às fibras (MN).....	87
Tabela 11 –	Resultado de ensaio da fase 2 – corpo de prova com cavilha de compósito, paralelo às fibras (CP)	87
Tabela 12 –	Resultado de ensaio da fase 2 – corpo de prova com cavilha de madeira, paralelo às fibras (MP)	88
Tabela 13 –	Resultado médio com corpo de prova no sentido normal às fibras (Fase 2)	89
Tabela 14 –	Resultado médio com corpo de prova no sentido paralelo às fibras (Fase 2)	90
Tabela 15 –	Resultado comparativo da resistência da cavilha do fase 1 e fase 2 de ensaios – no sentido paralelo às fibras.....	91
Tabela 16 –	Resultado médio comparativo da rigidez da ligação com cavilha de compósito (fase 2 de ensaios) com as cavilhas de compósito elaborados por Almeida (2019).....	92
Tabela 17 –	Dados obtidos em ensaios e analisados estatisticamente.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Cura x tempo	44
Gráfico 2 –	Resistência da ligação MN.....	49
Gráfico 3 –	Rigidez da ligação MN	50
Gráfico 4 –	Variação da densidade das cavilhas de madeira com 64 mm de comprimento	53
Gráfico 5 –	Variação do módulo de elasticidade das peças ‘A’, para elaboração dos corpos de prova da fase 2	63
Gráfico 6 –	Variação do módulo de elasticidade das peças ‘B’, para elaboração dos corpos de prova da fase 2	64
Gráfico 7 –	Variação do módulo de elasticidade das peças ‘C’, para elaboração dos corpos de prova da fase 2	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1-	Valor do parâmetro para cálculo da resistência da cavilha (β)	35
Equação 2 -	Valor do parâmetro para cálculo da resistência limite da Cavilha (β_{lim})	35
Equação 3 -	Esmagamento da cavilha.....	36
Equação 4 -	Flexão da cavilha	36
Equação 5 -	Comprimento crítico da fibra	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CLT	Cross Laminated Timber
COV	Coeficiente de variação
DGEBA	Diglicidiléter de Bisfenol A
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
GFRP	Glass Fiber – Reinforced Polymer
MLP	Madeira laminada pregada
NBR	Norma brasileira
RIM	Reaction Injection Molding
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UEL	Universidade Estadual de Londrina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	21
2.1	PRINCIPAL	21
2.2	ESPECÍFICO	21
3	REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	22
3.1	ESTRUTURAS DE MADEIRA	22
3.1.1	A Madeira	22
3.1.2	Resistência dos Materiais	26
3.1.2.1	Deformação	27
3.1.2.2	Limite de deformação ou Deformação Residual	27
3.1.2.3	Resistência	28
3.1.2.4	Rigidez da Ligação	28
3.1.3	Estruturas: Ligações e Transmissão de Esforços	29
3.1.4	Estruturas com Elemento de Ligação do Tipo Cavilhas	31
3.1.4.1	Desempenho Mecânico - Resistência das Cavilhas	35
3.1.4.2	Desempenho Mecânico - Rigidez das Ligações com Cavilhas	37
3.2	COMPÓSITOS	37
3.2.1	Polímeros	38
3.2.1.1	Resina Epóxi – Componente Matriz	39
3.2.1.2	Elemento de Reforço – Fibra de Vidro	40
3.2.2	Processo de Cura	42
3.2.3	Processo de Adesão	44
3.2.4	Processo de Conformação	45
3.3	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1	MATERIAIS	46
4.1.1	Madeira	46
4.1.2	Compósito - Sistema de Resina Epóxi	47
4.1.3	Compósito – Elemento Estrutural - Fibra de Vidro	47

4.2	MÉTODO	48
4.2.1	Níveis de Ensaio e Interpretação dos Resultados	48
4.2.2	Inserção de Elementos Flexibilizadores	50
4.2.3	Confecção das Cavilhas de Madeira	52
4.2.4	Confecção das Peças de Madeira para Corpos de Prova	57
4.2.5	Confecção das Cavilhas de Compósito	66
4.2.6	Montagem dos Corpos de Prova	73
4.2.7	Aparelhos de Carregamentos e Base Metálica	77
4.3	ENSAIOS MECÂNICOS	78
4.3.1	Normas	78
4.3.2	Protocolo de Ensaios e Amostragem	78
4.3.3	Máquinas de Testes	79
5	RESULTADOS E DISCUÇÕES	81
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DA FASE 1	82
5.1.1	Resultado Inicial com Cavilha de Madeira e Cavilha de Compósito	82
5.1.2	Resultado das Cavilhas de Compósito com Resina Flexível	84
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DA FASE 2	85
5.2.1	Corpo de Prova Sentido Normal às Fibras com Cavilhas de Compósito	86
5.2.2	Corpo de Prova no Sentido Normal às Fibras com Cavilhas de Madeira	86
5.2.3	Corpo de Prova no Sentido Paralelo às Fibras com Cavilhas de Compósito	87
5.2.4	Corpo de Prova no Sentido Paralelo às Fibras com Cavilhas de Madeira	88
5.2.5	Comparativo: Cavilha de Madeira x Cavilha de Compósito	88
5.2.6	Tratamento estatístico: Cavilha de Madeira x Cavilha de Compósito	93
5.3	MODO DE RUPTURA	93
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	97
	REFERÊNCIAS	99

ANEXO 1 –	Boletim técnico – Sistema de Resina Epóxi SQ2001 / SQ3154	103
ANEXO 2 –	Boletim técnico – Sistema de Resina Epóxi Flexível SQ2220 / SQ3154.....	105
ANEXO 3 –	Boletim técnico – Fibra de Vidro Picada 238 F – OWENS CORNING	106
ANEXO 4 –	Desenho do Aparelho de Carregamento Utilizado na Fase 1 de Ensaios	108
ANEXO 5 –	Protocolo de Ensaios – Fase 1 – Cavilhas de Madeira e de Compósito.....	109
ANEXO 6 –	Protocolo para Elaboração de Cavilhas Pré-fabricadas de Compósito – (60 mm) – (Sistema SQ 2001 / SQ 3154).	110
ANEXO 7 –	Protocolo para Elaboração de Cavilhas Pré-fabricadas de Compósito – (64 mm) – (Sistema SQ 2001 / SQ 3154 e SQ 2220 / SQ 3154).....	111
ANEXO 8 –	Receita para Elaboração das Cavilhas de Compósito – 6,0 cm x 1,27 cm – Sistema de Resina Epóxi SQ 2001 / SQ 3154 – Fase 1 de ensaios.....	113
ANEXO 9 –	Receita para Elaboração das Cavilhas de Compósito – 6,0 cm x 1,27 cm – Sistema de Resina Epóxi SQ 2001 / SQ 3154 e SQ 2220 / SQ 3154 – Fase 2 de ensaios.....	114
ANEXO 10 –	Receita para Elaboração das Cavilhas de Compósito – 6,4 cm x 1,27 cm – Sistema de Resina Epóxi SQ 2001 / SQ 3154 e SQ 2220 / SQ 3154 – Teste com percentuais de 10%, 30%, 50% e 70%	116
ANEXO 11 –	Tabela com Resultados de Ensaio da Fase 1 – Corpo de Prova com Cavilha de Madeira	118
ANEXO 12 –	Tabela com Resultados de Ensaio da Fase 1 – Corpo de Prova com Cavilha de Compósito Sistema Resina Epóxi SQ 2001 / SQ 3154.....	119
ANEXO 13 –	Tabela com Resultados de Ensaio da fase 1 – Corpo de Prova com Cavilha de Compósito Sistema Resina Epóxi SQ2001 / SQ3154 com Percentuais de 10%, 30%, 50% e 70% do Sistema de Resina Epóxi SQ2220 / SQ3154.....	120

1 INTRODUÇÃO

Cabe contextualizar inicialmente que esta pesquisa foi desenvolvida simultaneamente com outras duas que também tiveram em sua essência trabalhar as cavilhas elaboradas com compósito de resina epóxi e fibra de vidro. São os trabalhos de ALMEIDA, A.C. – Aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro - GFRP em ligações cavilhadas para CLT; e o trabalho de BARCAROLO, L.R.V. - Estudo de eficiência de ligações por cavilha de compósito estrutural em vigas de madeira laminada; diferenciando entre elas a amplitude das estruturas de madeira, com os respectivos elementos de ligação.

A madeira caracteriza-se como um recurso renovável, que apresenta baixa densidade e alta resistência em relação a outros materiais de uso convencional. Ela vem sendo utilizada como matéria-prima ao longo da história da humanidade, seja na confecção de pequenos e simples objetos, em estruturas de máquinas e de meios de transporte, nas edificações comumente nas estruturas de telhados até em estruturas verticais com vários andares.

Limitações decorrentes das dimensões, da anatomia e do próprio projeto que se deseja executar com a madeira, passam a exigir o uso de técnicas construtivas e de elementos de ligação específicos.

Neste contexto, dedicação especial deve ser dada às estruturas de madeiras, comumente as estruturas de telhados, em barracões destinados a armazenagem de produtos químicos, ou de construções sujeitas à maresia, que necessitam de algum dispositivo de ligação, com menor vulnerabilidade possível.

As estruturas estão sujeitas a cargas que variam de intensidade e sentido, transmitidas ao longo da secção da madeira e através da própria ligação. Dependendo das variáveis, como o tipo de ligação, os materiais utilizados, a geometria e o dimensionamento do elemento de ligação, a própria carga a que está sujeita, o posicionamento e a quantidade de elementos de ligação, o percentual de umidade da madeira e a presença de defeitos nela, irão proporcionar à estrutura maior ou menor resistência; sendo a ligação, porém, a região de maior vulnerabilidade e sujeita à ruptura.

Portanto, encontrar alternativas construtivas ou materiais para a elaboração das ligações significa contribuir para a confecção de estruturas de madeira de melhor desempenho mecânico.

Assim, de forma inovadora, este trabalho apresenta uma solução criativa para quase todas estas argumentações, fazendo uso do dispositivo de ligação do tipo cavilha, técnica de uso secular, e que apresenta excelente desempenho mecânico. Mas que transportada aos dias atuais, torna-se inviável, esbarrando na necessidade de ser elaboradas com madeiras tidas como nobres, em extinção.

Dentre outros materiais possíveis então de serem utilizados, destacamos o uso do adesivo de resina epóxi. Esse é caracterizado como um adesivo estrutural devido à sua alta resistência química, física e mecânica, sendo capaz de transferir as tensões absorvidas entre os substratos. Além disso, tem baixa densidade, excelente capacidade de adesão a diversos materiais e é impermeável; porém, é de ruptura frágil.

Contudo, essas propriedades da resina epóxi podem ser ampliadas ou melhoradas ao se incorporar outros elementos de caráter estrutural à matriz, como é o caso dos materiais fibrosos. Dessa maneira, surgem os materiais compósitos, constituídos de um elemento matriz – a resina – e outro estrutural – as fibras.

Os compósitos elaborados com polímeros e reforçados com fibras são também denominados como plásticos de engenharia, segundo Borschiver e Oliveira (2016). Ao longo da história, complementam Rezende e Botelho (2000) que os polímeros tiveram um uso restrito a alguns setores da indústria, devido ao seu custo de obtenção; porém destaca que observa o uso dos compósitos em novas utilizações.

Neste contexto, se faz oportuno, ao segmento que tem na madeira sua matéria-prima principal, estar alinhado com este movimento, seja através do uso das novas tecnologias de materiais ou das diversas metodologias de trabalho, assim contribuindo para o desenvolvimento do setor e também melhorar o desempenho das ligações nas estruturas de madeira.

Neste contexto inovador, fazendo uma releitura à elaboração e uso do dispositivo do tipo cavilha, desejava-se inicialmente injetar o compósito em orifícios pré-elaborados das estruturas, nos quais sua cura seria “*in situ*”.

Justifica-se este raciocínio, pois com base nos princípios de adesão, aonde visualizava quatro superfícies em adesão: duas delas entre a madeira da estrutura e a parede externa do elemento de ligação, e as outras duas entre a resina e as fibras do compósito. Porém, as limitações de tempo e de recursos definiram como limite desta pesquisa a elaboração das ligações com cavilhas pré-fabricadas com o

compósito, ou seja, confeccionadas à parte e inseridas nos respectivos orifícios após cura.

Mesmo alterando o curso do projeto inicial, obteve-se como resultado final da pesquisa a semelhança no desempenho das cavilhas de madeira com as de compósito. Mas soma - se a este resultado positivo, outros identificados no método utilizado, como: uso da cavilha com diâmetro de $\frac{1}{2}$ polegada (12,7 mm) quando a norma brasileira limita a 16 mm. E, uso de madeira da classe C 60, segundo a mesma norma, para elaboração das cavilhas, foi realizado com madeira da classe C 40.

Estes resultados, trazem novas argumentações com potencial científico para adequações aos modelos atuais de ligações com cavilhas em estruturas de madeira ou para a continuidade de estudos, visando melhorar as propriedades dos materiais, das técnicas de obtenção do componente de ligação e possível utilização em escala.

2 OBJETIVOS

2.1 PRINCIPAL

Analisar o desempenho das cavilhas elaboradas com compósito de resina epóxi e fibra de vidro, em ligações de estruturas de madeira.

2.2 ESPECÍFICO

- Conhecer as propriedades de resistência mecânica das cavilhas de madeira e de compósito, isoladas das ligações de madeira.

3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

3.1 ESTRUTURAS DE MADEIRA

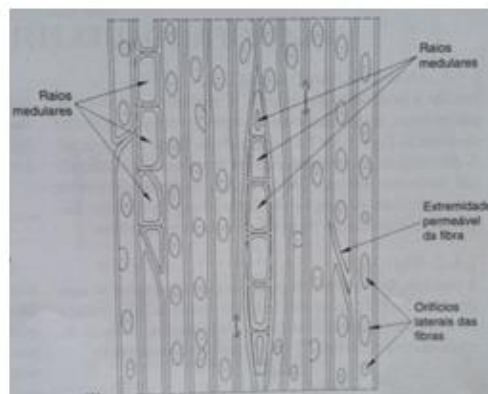
3.1.1 A Madeira

Engler (1954, 1964 *apud* BURGER; RICHTER, 1991) elabora um sistema de classificação da evolução dos vegetais, agrupando-os em dezessete divisões. Porém, apenas dois grupos são de interesse para os estudos da anatomia da madeira – divisões Gimnospermae e Angiospermae – por apresentarem o xilema secundário (alburno). Esse é característico de plantas lenhosas e constituído por células mortas impregnadas de lignina e reforçadas com celulose.

Complementam que as gimnospermas são representadas pelas árvores que apresentam “estróbilos unissexuais (cones)”, também denominadas de coníferas. Já as angiospermas dicotiledôneas, apresentam flores e sementes dentro dos frutos, sendo chamadas simplesmente de folhosas. Além dessas diferenças botânicas, gimnospermas e angiospermas também apresentam diferenças na estrutura anatômica de suas madeiras.

Destacam Pfeil e Pfeil (2008) que a madeira possui uma microestrutura composta de células, denominadas fibras. São similares a tubos de paredes finas (figura1), alinhadas na direção axial do tronco e coladas entre si. Possuem diâmetro variando de 10 a 80 micra e comprimento de 1 a 8 mm.

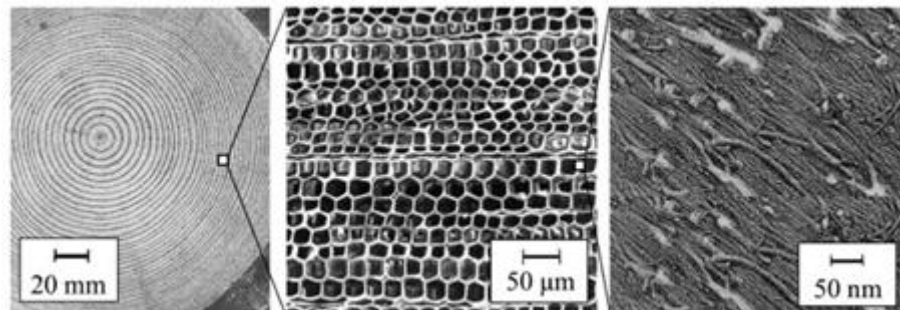
Figura 1 - Secção tangencial ampliada do tecido celular de árvore conífera



Fonte: Pfeil e Pfeil (2008).

Explicam Albuquerque e Latorraca (2000) que cada espécie de árvore possui um padrão de crescimento, no qual configuram-se lenhos denominados de iniciais e tardios. Aqueles são formados por grandes células e estes, por células robustas, sendo significativo considerar que existe uma proximidade relativamente pequena entre estas duas zonas. Essa proximidade confere uma superfície com inter-relações, ora porosa no lenho inicial, hora mais densa no lenho tardio, determinando características de permeabilidade diferenciada em cada uma destas zonas (figura 2).

Figura 2 - Hierarchical structure of wood: concentric growth rings (left), honeycomb structure of wood cell (middle), fiber composite structure of cell wall (right)”



Fonte: Borst *et al.* (2013).

Cabe destacar que a porosidade de um material consiste na relação de espaços vazios existentes nele – que podem ou não estar interligados. Isso permite maior ou menor fluxo de líquidos ou gases caracterizando, assim, a permeabilidade do material.

Para Wangaard (1979 apud PFEIL *et al.*, 2008), a madeira é um material compósito no qual as fibras, formadas por celulose, constituem-se no elemento estrutural. Já a matriz, de hemicelulose e de lignina, tem a função de manter os filamentos unidos e promover a rigidez à compressão das fibras.

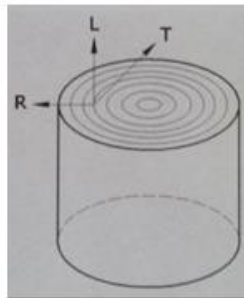
Dentre as propriedades físicas da madeira, há a característica delas serem um material anisotrópico. São definidos três planos ou eixos de extração das madeiras e, para cada uma destas direções, a madeira apresenta comportamento físico e mecânico diferenciado, ou eixos são:

- Transversal: perpendicular ao eixo da árvore,
- Longitudinal radial: paralelo aos raios ou perpendicular aos anéis de crescimento,

- Longitudinal tangencial: tangenciando os anéis de crescimento ou perpendicular aos raios.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2008) existem muitas diferenças de propriedade entre direção radial e a tangencial; porém, cabe diferenciar as propriedades da madeira no sentido longitudinal (sentido principal das fibras) para com a direção perpendicular às mesmas (figura 3).

Figura 3 - Anisotropia da madeira. São indicadas as direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T)



Fonte: Pfeil e Pfeil (2008).

Outro elemento a considerar nas propriedades físicas da madeira, segundo Pfeil e Pfeil (2008), é a umidade. Essa se faz presente na madeira de duas formas: no interior das cavidades ocas das fibras e nas paredes dessas. A umidade de equilíbrio é 12%.

Contudo, sendo a madeira natural, apresenta defeitos que, dependendo da sua quantidade, dimensão e localização, podem desclassificar a peça de madeira para o seu uso. A norma NBR 11700:91 - Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento para uso geral – classificação (ABNT, 1991) e a norma NBR 2299:10 - Madeira serrada de folhosas – defeitos – classificação (ABNT, 2010) são referência para a classificação das madeiras.

Moura *et al.* (2012) sintetizaram, no Manual de classificação visual de peças estruturais de madeira de Pinus, os nós (figura 4) e os defeitos (figura 5) que afetam a resistência da madeira.

Figura 4 - Manual para classificação da madeira - nós

<p>NÓ CARIADO (UN SOUND KNOT) Nó que possui uma parte deteriorada por agentes biológicos (fungos) e agentes mecânicos (broca).</p>	
<p>NÓ GRAVATA (SPIKE KNOT) Dois nós alongados que se direcionam para o mesmo ponto.</p>	
<p>NÓ DE QUINA (CORNER KNOT) Nó que aparece em duas faces da peça ao mesmo tempo.</p>	
<p>NÓ SOLTO (LOOSE KNOT) Nó que solta da peça, durante ou após a secagem da madeira.</p>	
<p>NÓ FIRME (TIGHT KNOT) Nó que se mantém firme a peça, mesmo após a secagem da madeira.</p>	
<p>NÓ ESPORA (PIN KNOT) Nós com no máximo 3mm de diâmetro.</p>	
<p>NÓ VAZADO (KNOT HOLE) Buraco na peça deixado por um nó que se soltou da peça.</p>	

Fonte: Adaptado de Moura *et al.* (2012).

Figura 5 - Manual para classificação da madeira – defeitos



Fonte: Adaptado de Moura *et al.* (2012)

3.1.2 Resistência dos Materiais

Para Philpot (2016) um projeto de estrutura seguro deve levar em consideração três aspectos dos materiais, que são:

- **Resistência:** relacionada à capacidade do objeto suportar cargas a ele aplicadas, sem se romper ou apresentar fraturas; assim como ter suas características físicas preservadas, mesmo a carregamentos repetitivos.
- **Rigidez:** que o objeto possua a propriedade de deformação em um determinado limite, permitindo a sua utilização.
- **Estabilidade:** O objeto, à ação de cargas, permanecerá em equilíbrio, permitindo que continue a desempenhar suas funções.

3.1.2.1 Deformação

Os materiais quando submetidos a mudanças de temperatura ou a cargas externas, se deformam.

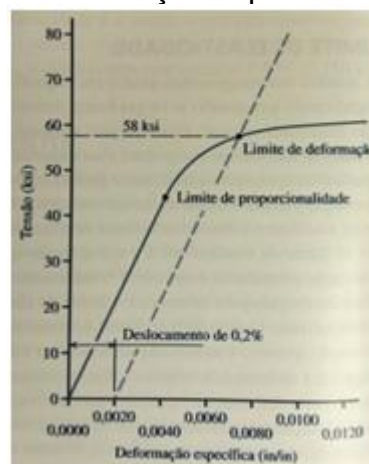
Segundo Popov (1978) as deformações ocorrem de ponto a ponto na estrutura interna do material e, podem se expressar em três direções ortogonais entre si, identificadas pelos eixos das coordenadas: x, y e z; e, são descritas como deformação linear e angular, ou de cisalhamento.

3.1.2.2 Limite de deformação ou deformação residual

É descrito por Hibbeler (2010) que alguns materiais não possuem um ponto de escoamento bem definido. Sendo assim, a prática é definir graficamente o limite de escoamento através do método da deformação residual.

Segundo Philpot (2016) é a tensão que ocasionará uma deformação permanente no material, estabelecida em 0,05% ou 0,2%. Para determinar o limite de deformação, basta traçar uma reta paralela à linha do módulo de elasticidade à 0,2%. Quando a reta interceptar o diagrama tensão – deformação, este será o ponto definido como limite de deformação, cuja tensão se identifica traçando, a partir deste ponto, uma linha paralela ao eixo das abscissas (figura 6).

Figura 6 – Deformação específica ou residual



Fonte: Philpot (2016).

Popov (1978) ainda complementa que alguns materiais possuem o ponto de escoamento muito próximo do limite de proporcionalidade. Portanto, para materiais

nesse contexto, faz-se uso do método de deslocamento, onde uma linha é traçada paralelamente à porção reta do diagrama tensão – deformação inicial, a 0,2 % desta.

3.1.2.3 Resistência

Descreve Hibbeler (2010) que a resistência de um material ou de uma estrutura está diretamente relacionada: ao tipo de material, às dimensões dos seus elementos, a sua deflexão e estabilidade quando sujeito a cargas externas. Enfim, estuda as relações entre as cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem, de maneira recíproca, para manter o equilíbrio deste.

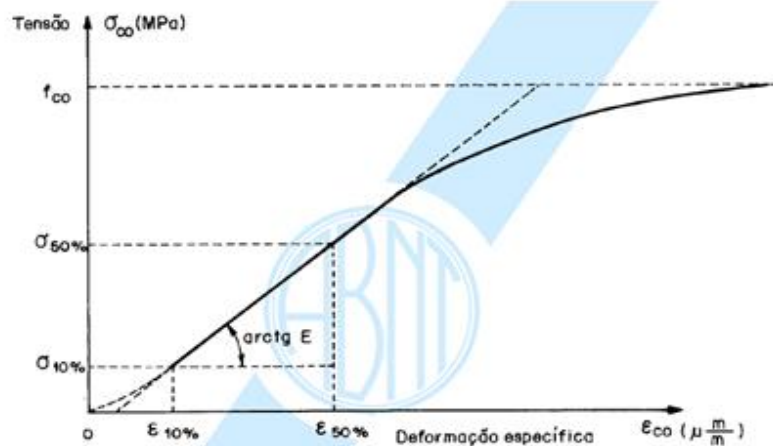
A NBR 7190:97 (ABNT, 1997) descreve a resistência como a capacidade da matéria de suportar tensões. É determinada pela maior tensão aplicada a corpos de prova, isentos de defeitos, até o aparecimento de deformações específicas e excessivas, ou a própria ruptura. Destaca ainda que a duração do carregamento e o percentual de umidade presente no material, no caso a madeira, são impactantes neste resultado.

3.1.2.4 Rigidez da Ligação

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é uma propriedade mecânica que indica a rigidez de um material. Segundo Hibbeler (2010) a maioria dos materiais de engenharia apresentam uma relação linear entre tensão e deformação na região elástica. Como resultado, essa relação linear, representada por uma reta, posiciona-se numa determinada inclinação que corresponde ao módulo de elasticidade.

Segundo a NBR 7190:97 (ABNT, 1997), o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação (figura 7), definida pelos pontos correspondentes a 10% e 50% da resistência de compressão, medida no ensaio.

Figura 7 - Diagrama tensão - deformação específica para determinação da rigidez



Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

3.1.3 Estruturas: Ligações e Transmissão de Esforços

As estruturas são formadas, de maneira geral, por elementos mecânicos sujeitos a forças externas, as quais são transmitidas a cada um de seus componentes. Assim, estes devem estar sujeitos a uma mesma intensidade de força, para que a estrutura mantenha-se em equilíbrio.

Portanto, é necessário compreender esse dinamismo. Em especial, a resistência dos materiais às cargas sobre eles aplicadas, as quais determinam deformações que podem ser elásticas ou plásticas.

Para Beer *et al.* (2015) as estruturas de engenharia são passíveis de deformações, assim, quando se faz o projeto, o importante é reconhecer as cargas que irão agir sobre as estruturas e sobre cada um de seus componentes, dimensionando-os de tal forma que as deformações sejam limitadas.

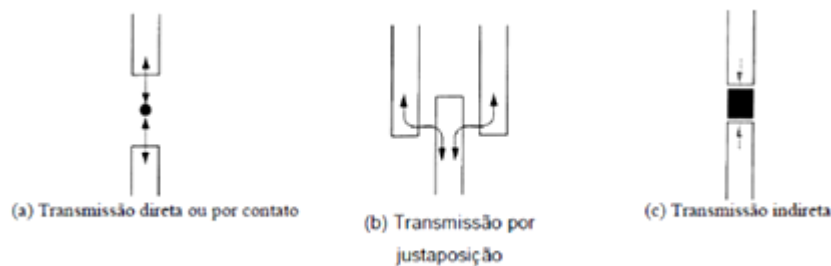
Stamato (2002) que no dimensionamento e análise das estruturas de madeira, é preciso considerá-las num equilíbrio entre flexíveis e rígidas, para que se verifique na estrutura pronta o comportamento próximo ao planejado. Sendo assim, afirma que “grande parte das ligações se comporta como algo intermediário entre o rígido e o flexível.”

Além disso, complementam Szücs *et al.* (2015), as estruturas de madeiras necessitam de ligações para sua conformação – seja pelas características anatômicas do próprio material, ou das suas dimensões. Cada uma destas ligações, além da função de unir as partes, tem também o objetivo de garantir a sustentação da estrutura e a transmissão dos esforços.

Os esforços para Le Govic (1995 apud SZÜCS *et al.*, 2015), podem ser transmitidos de três maneiras (figura 8):

- Transmissão direta: são aquelas que não possuem elementos de ligação, representados pelos entalhes ou sambladuras (figura 8a).
- Transmissão por justaposição: são aquelas em que há o transpasse comum entre peças ligadas utilizando conectores ou adesivos (figura 8b).
- Transmissão indireta: é representada pela ligação sem o transpasse das peças, sendo os esforços transmitidos por elementos intermediários. Entre eles, elementos metálicos ou adesivos (figura 8c).

Figura 8 - Formas de transmissão de esforços nas ligações de estruturas de madeira

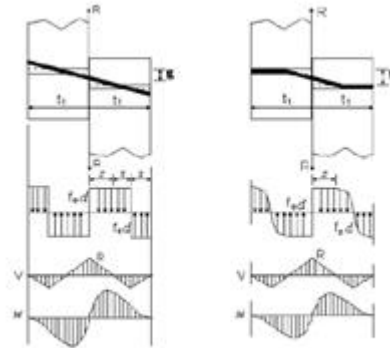


Fonte: Le Govic (1995 apud SZÜCS *et al.*, 2015).

Stamato (2002) confirma que a resistência da ligação ocorrerá tanto pela flexão do pino, quanto pelo seu embutimento na madeira. Isso está relacionado, diretamente, à espessura da madeira da ligação e à tensão limite de escoamento do pino.

Segundo Johansen (1949 apud STAMATO 2002), em uma ligação que possua “uma seção de corte e um pino rígido”, a pressão aplicada na ligação irá se dissipar pelo pino rígido sem provocar a sua flexão. Já, se o pino não for “suficientemente rígido”, ele irá fletir no seu limite de escoamento e, se a ligação for com dois planos cortantes, o pino com menor rigidez irá se fletir no centro e a sua ruptura se caracterizará pela flexão do pino (figura 9).

Figura 9 - Representação das ligações com uma seção de corte; à esquerda com pino rígido e à direita com pino flexível



Fonte: Johansen (1949 apud STAMATO, 2002).

Importante destacar a afirmação de Stamato (2002) que, além da própria NBR 7190:1997, outros códigos normativos, como: “EUROCODE 5 (Comitê Europeu de Normalização, 1993) e DIN 1052 (Deutsches Institut Für Normung, 1969).” seguem o modelo de Johansen.

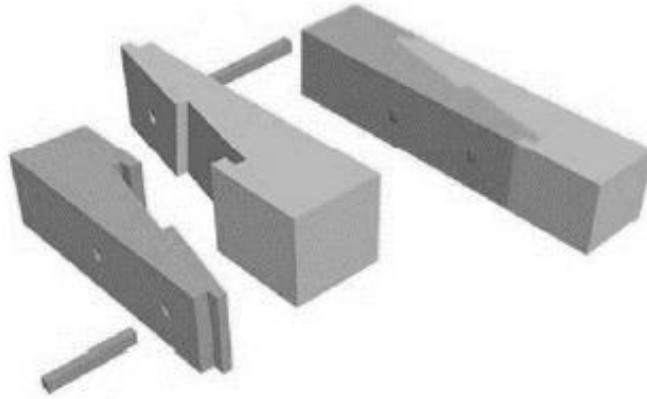
3.1.4 Estruturas com Elemento de Ligação do Tipo Cavilhas

Segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) as cavilhas são elementos de ligação, elaboradas em madeira torneada e, devem ser da classe de resistência C 60, que atribui a classificação de madeira dura.

Ligações em estruturas de madeira fazendo uso de cavilhas são uma prática antiga e, através delas, ocorre a transferência das cargas. Inicialmente elaboradas à mão, foram gradativamente caindo em desuso, até que retornaram graças às novas tecnologia em máquinas de usinagem.

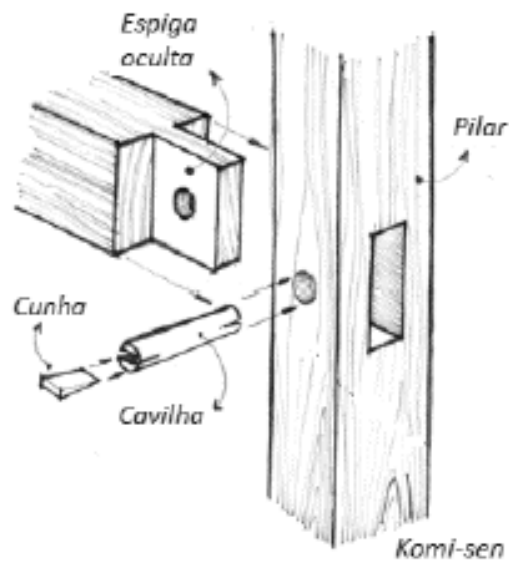
Segundo Ishikura, Molina e Bôas (2017) o sistema de construção japonês se destaca na arquitetura e engenharia pelos vários tipos de madeira, mas especialmente pela riqueza das ligações, com encaixes e cavilhas, chamadas Ookkakedaisentsugi, como na figura 10, e Komi-sem na figura 11.

Figura 10 – Representação de ligação Ookkakedaisentsugi, na arquitetura e engenharia japonesa



Fonte: Ishikura, Molina e Bôas (2017).

Figura 11 – Representação de ligação Komi-sen, na arquitetura e engenharia japonesa



Fonte: Ishikura, Molina e Bôas (2017).

Destacam também, Ishikura, Molina e Bôas (2017), que as antigas estruturas de madeira no Japão foram construídas sem utilização de elementos metálicos nas ligações. A utilização desta técnica construtiva se deve, entre outros, ao comportamento estrutural da madeira em caso de incêndio e terremotos, além da beleza arquitetônica obtida como resultado dos detalhes.

Outro exemplo de estrutura confeccionada com o conector do tipo cavilha – inclusive datadas de muitos anos -, como no sótão do Tabernáculo de Salt Lake, no estado de Utah, EUA (figura 12); que teve sua conclusão em 1867.

Figura 12 - Ligação com cavilha no sótão do Tabernáculo de Salt Lake



Fonte: CAVILHAS... (2019).

Ou ainda, segundo Junior *et al.* (2014), que analisam a estrutura de cobertura de galpão de estoque de produtos químicos, de 70 anos, localizado no estado de São Paulo (Brasil). Nesta, as ligações com cavilhas estão intactas, e se algum apresenta falha, são decorrentes da instalação mal realizada, e não de deterioração com o tempo (figura 13).

Figura 13 - Ligação com cavilha em Galpão para armazenagem de produtos químicos em São Paulo (Brasil)



Fonte: Junior et.al. (2014).

Destacam Junior *et al.* (2014), que na mesma estrutura, as ligações confeccionadas com pinos metálicos, para fixação das mãos-francesas, apresentavam elevado grau de deterioração por oxidação, devido à reação química com os materiais armazenados (figura 14).

Figura 14 - Ligação com pino metálico (pregos) em Galpão para armazenagem de produtos químicos em São Paulo (Brasil)



Fonte: Junior et.al. (2014).

Assim como, o sistema construtivo com cavilhas consiste numa alternativa em regiões sujeitas aos efeitos da maresia, principalmente no Brasil, pela dimensão da sua costa litorânea, em detrimento aos conectores metálicos nas estruturas de madeira, comprometendo o desempenho desta.

E, numa outra vertente construtiva, das estruturas dos mobiliários, as cavilhas representam uma alternativa de excelente desempenho estrutural.

Figura 15 - Ligação com cavilha em estrutura de mobiliário



Fonte: Cavilha (2019).

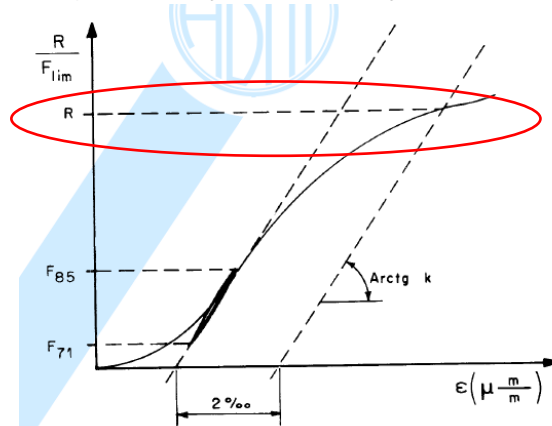
Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), as cavilhas são tidas como elementos estruturais e seus diâmetros devem ser de: 16 mm, 18 mm, 20 mm cravados em furos com o mesmo diâmetro. Para a norma ASTM D 8023–17, o diâmetro mínimo das cavilhas deve ser de 12,7 mm até o limite de 50 mm. (ASTM D8023, 2017).

3.1.4.1 Desempenho Mecânico – Resistência das Cavilhas

O desempenho mecânico da estrutura está relacionado às forças ou às cargas a que está sujeita, à direção e sentido, à intensidade e ao tempo de aplicação. Além disso, as características dos materiais envolvidos tornam-se variáveis a serem consideradas.

A norma NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta o diagrama força x deformação, específicos de uma ligação (figura 16). Neste é possível verificar que existe um deslocamento de 2 ‰, que corresponde à deformação plástica da ligação. A intersecção desta linha com a linha (R), correspondente à resistência.

Figura 16 - Diagrama força - deformação específica da ligação



Fonte: Adaptado da NBR 7190 (ABNT, 1997).

O cálculo da resistência de uma cavilha R corresponde a uma única seção de corte, determinado de forma semelhante ao empregado nos pinos metálicos. Considera-se, portanto, a flexão e o esmagamento do diâmetro da cavilha e a penetração nos elementos interligados. Segundo a norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997), no item 8.4.3 – resistência de uma cavilha, considera-se para as equações 1 e 2:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad \text{Equação 1}$$

$$\beta_{lim} = \sqrt{\frac{f_{c0,d,cav}}{f_{c90d,cav}}} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo: β = Valor do parâmetro para cálculo da resistência da cavilha

β_{lim} = Valor do parâmetro para cálculo da resistência da cavilha limite

t = espessura (figura 17)

d = diâmetro da cavilha

$f_{c0,d,cav}$ = valor de cálculo da resistência à compressão paralela da cavilha

$f_{c90,d,cav}$ = valor de cálculo da resistência à compressão normal da cavilha

Assim, decorrente da relação entre os valores de parâmetro, caracteriza-se a resistência da cavilha (R) pelo esmagamento ou pela flexão, segundo as expressões a seguir:

- Esmagamento da cavilha:

$$\beta \leq \beta_{lim}$$

Equação 3

$$R = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{c90,d,cav}$$

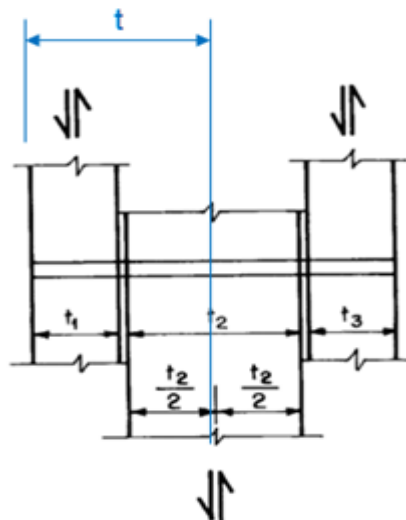
- Flexão da cavilha:

$$\beta > \beta_{lim}$$

Equação 4

$$R = 0,4 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{c0,d,cav} \quad (\text{com } \beta = \beta_{lim})$$

Figura 17 - Ligação de cavilha em corte duplo – representando a espessura ‘t’



Fonte: Adaptado da NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 35).

3.1.4.2 Desempenho Mecânico - Rigidez das Ligações com Cavilhas

A quantidade de cavilhas na ligação está diretamente relacionada ao conceito de rigidez das ligações expresso na norma NBR 7190 (ABNT, 1997) que não admite ligações de um único pino. Assim a pesquisa se baseia no conceito de ligação rígida, que exige quatro ou mais pinos.

3.2 COMPÓSITOS

Para Fonseca, Costa e Dias (2011) os compósitos constituem-se de uma matriz polimérica que possui a finalidade de manter as fibras unidas e transferir forças a elas. Além disso, confere propriedades mecânicas de resistência e elasticidade superiores a dos materiais de maneira individualizada.

Para Callister Júnior (2002) o compósito é todo material multifásico que combine as propriedades de cada um dos elementos de suas fases gerando um novo material, que exiba em conjunto, uma melhoria das propriedades ora apresentadas individualmente.

Complementa Callister Júnior (2002) que a maioria dos compósitos apresentam duas fases; sendo uma denominada de matriz e a outra dispersa. Está se apresenta de forma contínua e incorpora a outra fase. As propriedades finais do compósito são decorrentes das propriedades constituintes de cada um dos seus elementos, sendo que, o volume, a relação entre diâmetro e comprimento e a orientação da fase dispersa, complementam e definem as novas propriedades do material compósito.

Amaral *et al.* (2001) afirmam que, na preparação de materiais compósitos, as resinas epoxídicas são bastante utilizadas como elemento matriz, devido às suas excelentes propriedades de estabilidade térmica, resistência a solventes e boa adesão. Afirma, também, que a maioria dos compósitos de resina epoxídica citada na literatura busca melhorias da resistência à fratura. Esta característica, é obtida com a adição de agentes flexibilizantes que podem ser elastômeros líquidos ou polímeros termoplásticos.

3.2.1 Polímeros

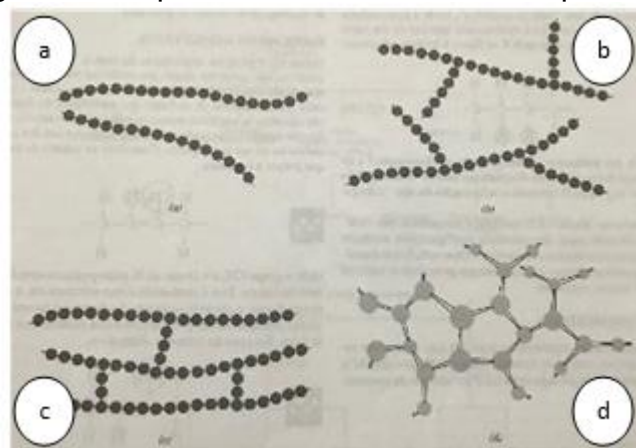
Segundo Mano e Mendes (1999) os polímeros são macromoléculas compostas de muitas partes, sendo cada uma delas denominada de mero, que se repetem ao longo da cadeia. Os átomos destas moléculas estão unidos entre si por ligações interatômicas covalentes, sendo a estrutura principal constituída por átomos de carbono. A regularidade e interação deste encadeamento têm impacto significativo nas propriedades dos polímeros.

Ao longo da história, complementa Rezende e Botelho (2000) que os polímeros tiveram um uso restrito a alguns setores da indústria, devido ao seu custo de obtenção.

Dentre os itens de classificação dos polímeros destacados por Mano e Mendes (1999) tem-se a solubilidade do polímero. Essa característica estratifica os polímeros em termoplásticos e termorrígidos; aqueles, amolecem pela ação do calor, mas tornam a endurecer quando são resfriados, sendo que possuem uma estrutura molecular linear. Já os termorrígidos são infusíveis e apresentam estrutura molecular reticulada, com ligações cruzadas.

Além do peso, a estrutura molecular também influencia nas propriedades do polímero, afirma Callister Júnior (2002); assim, estas divisões são apresentadas na figura 18: (a) lineares, (b) ramificadas, (c) cruzadas e em (d) rede. Dessas citadas, as redes apresentam três ligações covalentes ativas, determinando propriedades mecânicas e térmicas distintas das demais estruturas; exemplo deste tipo de estrutura são as resinas epoxídicas.

Figura 18 - Tipos de forma molecular dos polímeros



Fonte: Callister Júnior (2002)

Essa estrutura em rede das resinas epoxídicas irá variar de tamanho de entrelaçamento, dependendo dos materiais de sua origem. Quanto maior a rede, mais rígida será a resina epoxídica e quanto menor a rede mais flexível (denominada na literatura de “crosslink”). Como exemplo, as resinas epoxídicas à base de Bisfenol A – de custo mais baixo – apresentam menor “crosslink” em relação às de Bisfenol F, que possui maior custo e maior “crosslink”, com estrutura mais rígida.

Destacam, Kim *et al.* (2015) a importância de se conhecer a interação molecular que ocorre no momento de cura do compósito. Inclusive, o avanço da tecnologia aponta para estudos dos nanocompósitos, apresentando excelentes resultados no processo de adesão, com peso e volume relativamente menores ao tradicional. Isso se dá devido à interação das nanopartículas, formando uma camada de polímero rígida e conferindo excelentes propriedades mecânicas.

3.2.1.1 Resina Epóxi – Componente Matriz

Para Callister Júnior (2012), os poliésteres e os ésteres vinílicos são as resinas poliméricas mais baratas e de maior uso na elaboração dos compósitos reforçados com fibra de vidro. Já as resinas epóxis, com custo maior, são amplamente utilizadas como elemento matriz dos compósitos em aplicações aeroespaciais, além de serem de uso comercial. Isto justifica-se pelo fato de possuírem melhores propriedades mecânicas e maior resistência à umidade do que as resinas descritas inicialmente.

No sistema resina epóxi, o primeiro elemento – matriz – é a resina epoxídica, obtida pela reação mais comum entre a Epicloridrina e o Bisfenol A. Já o segundo elemento – endurecedor – é normalmente representado por aminas (primárias, secundárias, terciárias, alifáticas, cicloalifáticas, aromáticas), poliamidas, poliaminas, anidridos, entre outros.

Barcia, Sampaio e Soares (2003) afirmam que as resinas epoxídicas são amplamente utilizadas para o desenvolvimento de adesivos estruturais, seja por sua alta resistência química e física, como por suas excelentes propriedades mecânicas. Possui também, a capacidade de transferir as tensões absorvidas entre os substratos. Isto se deve ao seu diferencial em relação aos demais polímeros, por

possuir grupos funcionais que possibilitam a interação com diversos tipos de materiais.

Mittal, Saini e Sinha (2016) também destacam que além das características de resistência, a resina epoxídica se destaca pelas características relacionadas à sua cura, pois pode ocorrer à temperatura ambiente sem qualquer pressão ou ainda ser curada a quente; apresentando pouca ou nenhuma retração após a cura.

Brantseva *et al.* (2016) destacam que a resina epóxi por sua característica de ruptura frágil, apresenta fissuras precocemente à aplicação de cargas. As propriedades da resina podem ser melhoradas utilizando termoplásticos que contribuem para o endurecimento da resina, mas também melhoram seu desempenho mecânico.

Também citam Cranker e Breslau (1956) que as propriedades mecânicas das resinas epoxídicas são ampliadas com a melhoria no processo de cura; e, para isto sugere o uso dos polímeros líquidos, quando usado, acaba por ser intercalado ao longo da cadeia de epóxi, reduzindo o tempo de cura e conferindo maior flexibilidade.

Cranker e Breslau (1956) mostram que o desempenho da resina epóxi está diretamente relacionada ao volume e à interação entre os elementos do compósito.

Costa, Rezende e Pardini (1999), destacam a importância de conhecer a cinética de cura das resinas termorrígidas, sendo um processo bastante complexo que pode definir mudanças nas propriedades químicas e físicas de uma determinada formulação de resina / endurecedor.

3.2.1.2 Elemento de Reforço – Fibra de Vidro

Para Mittal, Saini e Sinha (2016), a adição de fibras na formulação do compósito com matriz de resina epóxi define dois benefícios. Um é representado pela redução do uso da resina, diminuindo os custos e o outro, pelo melhoramento das propriedades do compósito.

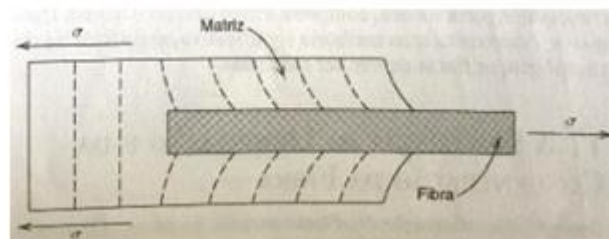
Explica Balseiro (2007) que as fibras de vidro são resultantes da mistura de areia, caulino, calcário e colemanite. A proporção de cada um irá classificar as fibras do tipo 'E', 'C', 'R', 'S' ou 'T'. Porém, para estruturas de engenharia, apenas as do tipo 'E' e 'S' são utilizadas. As do tipo 'E' possuem boas propriedades mecânicas a custo reduzido e as do tipo 'S' apresentam boa resistência a tração.

Ota (2004) esclarece que as fibras de vidro do tipo 'E' (E- glass), oriundas da mistura de óxidos de Si, Al, B, Ca e Mg (boro silicato de alumina e cálcio), estão disponíveis a baixo custo se comparadas com outras fibras e, possuem maior rigidez e resistência ao impacto. Porém, essas propriedades são superadas nas fibras do tipo 'S' (S – glass ou strength), que têm sua composição à base das substâncias SiO₂, Al₂O₃ e MgO.

Callister Júnior (2002) complementa que, no processo de elaboração das fibras de vidro, se entrarem em contato com a atmosfera acabarão por ter a superfície enfraquecida – interferindo na ligação com a matriz. Assim, as fibras são revestidas após seu estiramento para que sejam protegidas. Quando utilizada no compósito, a fibra de vidro passa por um processo de eliminação dessa proteção e substituindo por um elemento de acoplamento que irá melhorar a ligação da fibra à matriz.

Complementam que não apenas as propriedades das fibras são importantes para representar um melhor desempenho do compósito, como também a interação entre fibra e matriz. Isso é devido ao fato de que a carga recebida é transmitida através da matriz e absorvida pela fibra, cessando na extremidade desta (figura 19). Assim, a geometria da fibra, especificamente seu comprimento crítico, está diretamente relacionada ao diâmetro da fibra, para que resulte em maior resistência e enrijecimento do material compósito.

Figura 19 - Padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra que está sujeita à aplicação de uma carga de tração



Fonte: Callister Júnior (2002).

Callister Júnior (2002) sugere que o comprimento crítico da fibra seja obtido pela equação 5:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo: l_c - comprimento crítico da fibra

D - diâmetro da fibra
 σ^* - limite de resistência a tração
 τ_c - tensão limite de escoamento cisalhante

Esse comprimento crítico, seja para fibra de vidro ou de carbono, é aproximadamente 1 mm, algo entre 20 a 150 vezes do diâmetro da fibra. Assim, explica Callister Júnior (2002), as fibras que possuem o comprimento maior que o comprimento crítico são denominadas de contínuas (normalmente $l > 15 l_c$). Já aquelas cujo comprimento é menor que o comprimento crítico são denominadas curtas ou descontínuas. Não existindo a transferência de tensões da matriz, apenas conferem um pequeno reforço a esta. Por isso, afirma que para haver aumento significativo na resistência das fibras, estas devem ser contínuas.

Segundo Vojdani, Rezaei e Zareeian (2008 apud SOARES, 2010), em estudo realizado com fibras de vidro picadas, verificou-se que há necessidade de equilibrar o volume de fibra com a matriz polimérica. Isso não acontece em grandes concentrações de fibra, determinando a redução da resistência do compósito.

Callister Júnior (2002) conclui que as fibras contínuas conferem ao compósito a característica anisotrópica, em que a maior resistência está no sentido longitudinal das fibras e é quase nula no sentido transversal. Já os compósitos com fibras curtas e alinhadas aleatoriamente, apresentam características mecânicas isotrópicas. Mesmo reduzindo em 1/5 a eficiência do reforço, permite que sejam utilizados processos de produção com a moldagem por compressão, injeção e extrusão.

3.2.2 Processo de Cura

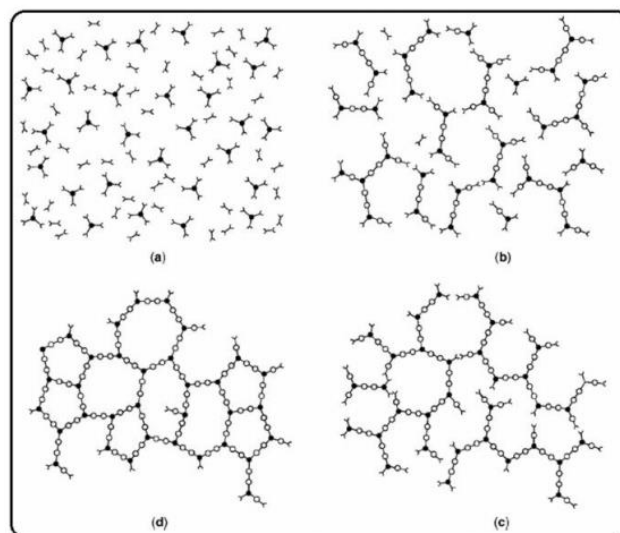
Pineda (2014) sintetiza a literatura a respeito do processo de cura da resina epoxídica (figura 20), descrevendo que se apresenta em três estágios:

- Primeiro: consiste na mistura dos reagentes, da resina e do agente de cura, denominada como etapa de indução;
- Segundo: ocorre o crescimento e a ramificação das cadeias poliméricas, formando uma rede reticulada, que recebe o nome de gelificação. Nesta o material passa do estado líquido para o estado de borracha,

- Terceiro: ocorre a vitrificação, que consiste no cessar do processo de reticulação, a qual produz uma estrutura rígida, podendo ocorrer apenas o fenômeno de difusão no estado sólido.

O tempo entre a etapa de indução e de gelificação, depois para a etapa de vitrificação, é representado pelos tempos de gelificação e de vitrificação, respectivamente.

Figura 20 - Estágios de cura da resina epoxídica: a) Etapa de Indução; b - c) Etapa de Gelificação; e - d) Etapa de Vitrificação



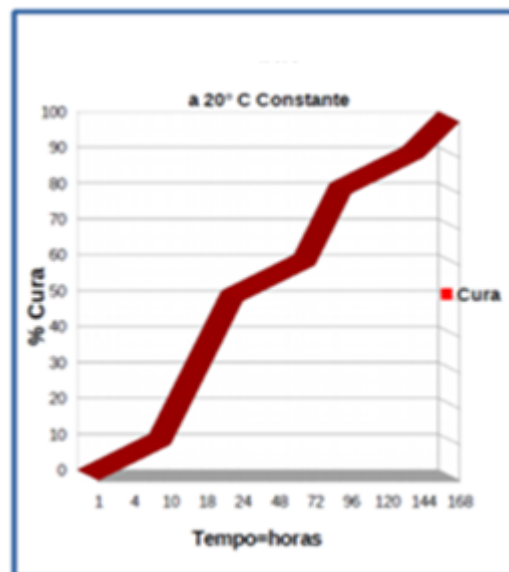
Fonte: Pineda (2014).

Para Costa, Rezende e Pardini (1999), os fenômenos macroscópicos da gelificação e da vitrificação são os mais importantes no processo de cura. Na gelificação o sistema passa de um líquido viscoso para um gel elástico. Na sequência, o processo de cura torna-se mais lento devido à densidade das ligações cruzadas, o que provoca aumento na temperatura de transição vítrea e nas propriedades do material. Por fim, à medida que a reação química termina, forma-se um sólido vítreo.

O estudo do ciclo de cura das resinas epóxis é algo que vem sendo estudado e experimentado ao longo dos anos, definindo, entre outros, os modelos termoquímicos. Loos, Springer (1983) destacam que a técnica frequentemente utilizada, com a vantagem de medir simultaneamente o calor da reação e a cinética de cura, é a calorimetria exploratória diferencial (DSC).

Empiricamente, segundo Sakamoto (2018), a cura dos sistemas epóxis irá variar em função da temperatura ambiente e da superfície à qual a resina estará exposta. De forma geral, em sistemas convencionais, a cura completa da resina será em torno de 7 dias; isso, desde que a temperatura seja constante – acima de 20°C – tanto no ambiente como na superfície de contato (gráfico 1).

Gráfico 1 - Cura x tempo



Fonte: Sakamoto (2018).

3.2.3 Processo de Adesão

Para Pineda (2014), um adesivo deve ser capaz de molhar a superfície e espalhar-se, em processo de adesão. Em seguida, num ângulo de contato próximo a zero, endurecer, determinando uma coesão forte como um sólido. Complementa que, na ligação do adesivo com o material, há a presença de forças de van der Waals (forças intermoleculares) e ligações intermoleculares divididas em adsorção física, ligação química e bloqueio mecânico.

Explica que a adesão pelo bloqueio mecânico ocorre quando o adesivo, ainda no estado líquido, penetra na superfície irregular do substrato, desloca o ar lá existente e, na sequência, endurece e ancora-se mecanicamente. Complementa, ainda, que essa interação mecânica é a base do processo de adesão, pois aumenta inclusive a área de contato e de travamento.

No processo de adesão, reforça Coutinho (2007 apud NASCIMENTO 2009) que “a molhabilidade depende da rugosidade das superfícies.” Destaca que é

importante conhecer a rugosidade da superfície dos materiais, já que nela é possível conhecer os fenômenos superficiais. Entre outros, a rugosidade aumenta a área de contato e proporciona a retenção mecânica de outros materiais.

Segundo Raponi (2017), o histórico do processo de cura do compósito é significativo para determinação das suas propriedades mecânicas, sendo o seu monitoramento determinante para a garantia e para o melhoramento das suas propriedades.

3.2.4 Processo de Conformação

Carneiro e Teixeira (2009) definem como sistemas curados *in situ* aquele que são preparados a partir de fibras contínuas e recebem camada de resina epoxídica, ocorrendo a cura no local e definindo a forma desejada. Assim, ambas as definições trazem em comum o aspecto da cura e da respectiva conformação no local desejado.

Complementando o entendimento sobre as técnicas de conformação, Callister Júnior (2002) apresenta conceitos das possíveis técnicas, que podem ser: “moldagem por compressão, transferência, insuflação, injeção e extrusão”.

Porém, faz quase que exclusivamente em referência aos polímeros termoplásticos. Já para os termofixos, observa que é possível fazer uso da técnica de injeção, com a inserção do material num molde aquecido, processo denominado de “moldagem por injeção com reação (RIM – Reaction Injection Molding).”

3.3 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As estruturas de madeira necessitam de ligações para transmissão dos esforços e complemento de suas dimensões. O ideal é que o conjunto de estrutura e suas ligações estejam em equilíbrio.

Como elemento de ligação, as cavilhas convencionais de madeira devem ser elaboradas respeitando alguns critérios estabelecidos por normas. Devem ser executadas com madeira da classe C 60, possuir determinadas dimensões e ter a quantidade e posicionamento dimensionados para as ligações.

A avaliação da resistência de uma cavilha é medida pela sua flexão ou pelo seu embutimento na estrutura; e, a sua rigidez, pelo módulo de elasticidade.

Os compósitos apresentam componente matriz e componente estrutural. A resina epóxi – componente matriz desse estudo – por sua alta resistência, excelente adesão a diversos materiais, leveza e impermeabilidade, não sofre retração durante e após a cura; sendo, sua ruptura frágil. Contudo, essa característica pode ser amenizada com o uso conjunto de um percentual de resina epóxi flexível. O próprio componente estrutural – a fibra – contribui para melhorar essa propriedade.

A resina epóxi tem a propriedade de absorver as cargas recebidas pela estrutura através das ligações, passando pelo elemento de ligação, pela cavilha e dissipando as cargas através das fibras. Dessa forma, a mistura da resina epóxi e da fibra de vidro deve ser criteriosa, assim como a com o endurecedor também, para que formule uma mistura homogênea.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Madeira

Os corpos de prova da fase 1 de ensaios são constituídos de uma peça transpassada por uma cavilha; e, o corpo de prova da fase 2 de ensaio, é constituído por três peças em madeira, interligadas por 4 cavilhas cada. Essas, elaboradas em madeira ou em compósito.

Essas peças foram confeccionadas com madeira de *Pinus taeda*, com módulo de elasticidade médio de 13.304 MPa e densidade média de 645 kg/m³, segundo anexo E na tabela E3 da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

As cavilhas de madeira para o nível 1 de ensaios foram elaboradas com madeira de Jatobá, da classe C 60, com módulo de elasticidade médio de 23.607 MPa e densidade média de 1074 kg/m³, segundo anexo E na tabela E2 da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

Já as cavilhas para a fase 2 de ensaios, foram em madeira de *Corymbia Citriodora*, com módulo de elasticidade médio de 19.421 MPa e densidade média de 999 kg/m³, segundo anexo E na tabela E1 da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

4.1.2 Compósito - Sistema de Resina Epóxi

O Sistema de resina epóxi – resina epóxi e endurecedor – são do fornecedor SILAEX QUÍMICA LTDA, da cidade de São Paulo/SP.

Para a realização da pesquisa foram utilizados dois sistemas: o sistema SQ 2001 (resina)/SQ 3154 (endurecedor) e o sistema SQ 2220 (resina)/SQ 3154 (endurecedor), cujos boletins técnicos encontrasse no anexo 1 e 2, respectivamente.

O sistema de resina epóxi SQ 2001/SQ 3154, com peso específico médio de 1,08 g/cm³, é indicado para ser utilizado em formulações isenta de solventes, proporcionando boa fluidez, facilidade no processamento e contração mínima. Além disso, garante estabilidade aos ciclos térmicos, impactos e ações mecânicas, boa adesão, resistência mecânica, fácil impregnação e confere a característica de dureza típica das resinas epoxídicas.

O endurecedor é a base de poliamida modificada, promovendo a melhor adesão e proporcionando boa resistência térmica, química e mecânica, com baixa reação exotérmica (liberação de calor decorrente da reação química dos elementos e que é transferida do meio interno para o meio externo). Possui boa solubilização com a resina em proporções não críticas, proporcionando a cura homogênea, com boa velocidade e propriedades finais bastante controláveis.

O sistema de resina epóxi flexível SQ 2220/SQ 3154, com peso específico médio de 1,06 g/cm³, apresenta baixa viscosidade, transparência, boa flexibilidade, adesividade e tenacidade. E, reagindo com os endurecedores específicos, forma um termofixo flexível.

4.1.3 Compósito – Elemento Estrutural - Fibra de vidro

A fibra de vidro particulada, obtida através do fornecedor Owens Corning, referência 238 F, caracteriza-se por ser a fibra picada para reforço em resina fenólica, epóxi, baquelite e poliéster insaturado. Seu comprimento é de 4 mm, o diâmetro do fio é de 15 microns e a densidade de 2,62 g / cm³, cujo boletim técnico encontrasse no anexo 3.

A opção pela fibra de vidro picada deve-se ao fato do desejo inicial do pesquisador, após a formulação do compósito, poder injetá-lo no orifício destinado à cavilha e promover a sua cura *in situ*. Porém, por algumas limitações, a pesquisa

teve como limite a elaboração das cavilhas na configuração de cavilhas pré-moldadas.

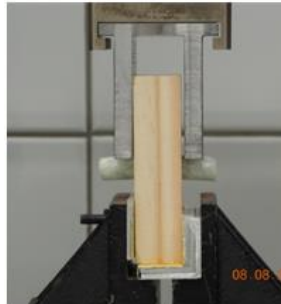
4.2 MÉTODO

4.2.1 Fases de Ensaio e Interpretação dos Resultados

Duas fases de ensaios foram definidos e realizados durante o processo de pesquisa, denominados de fase 1 e de fase 2.

O ensaio da fase 1 (figura 21), referenciado pelas normas ASTM D5764 – 97a e a NBR 7190:97, teve por objetivo identificar as propriedades físicas e mecânicas das cavilhas, elaboradas com compósito polimérico e em madeira.

Figura 21 – Ensaio da fase 1

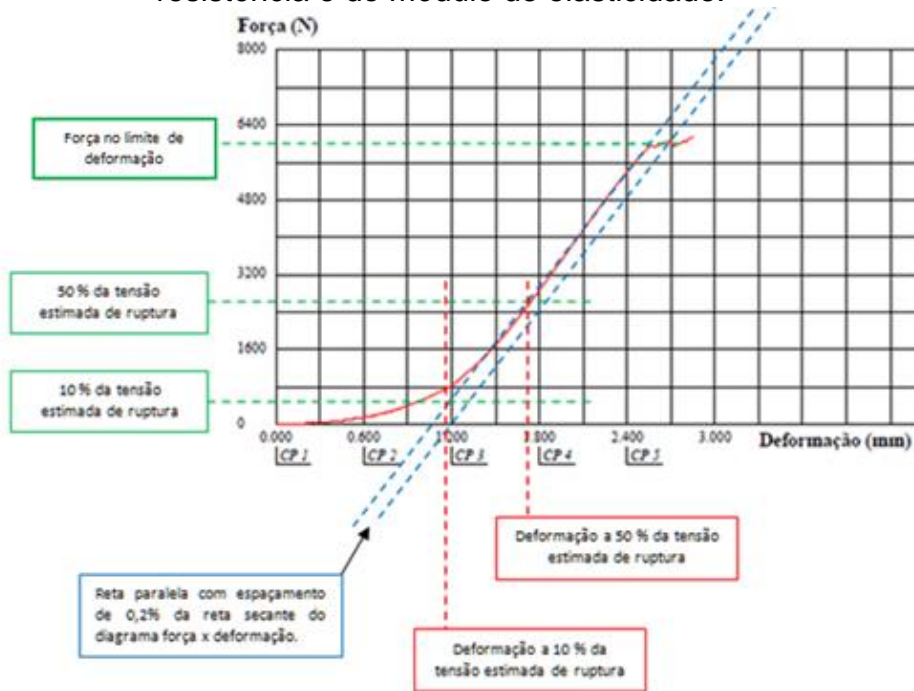


Fonte: Autor.

Diante dos resultados expressos nos gráficos, obtidos nos ensaios da fase 1 com cavilhas de madeira e de compósito e, fazendo uso dos conceitos descritos na norma NBR 7190:97 e dos princípios da resistência dos materiais, será possível conhecer as propriedades mecânicas dessas.

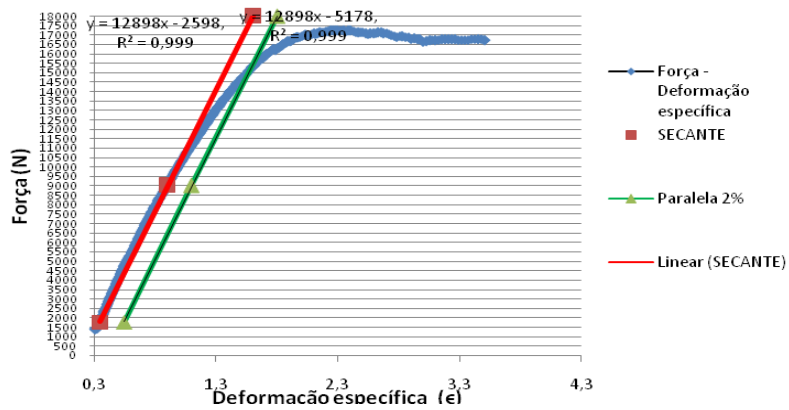
Através da (figura 22), verificam-se as retas, secante e paralela a 2% desta, auxiliares para a obtenção dos valores de resistência da ligação e das cavilhas, assim como a rigidez da ligação. Estas retas foram possíveis de serem elaboradas, utilizando-se do programa Excel e do bloco de notas obtido durante os ensaios, como pode ser visualizado no gráfico 2, a resistência da ligação e no gráfico 3, a rigidez da ligação.

Figura 22 - Esboço de análise do gráfico para coleta de dados e cálculo da resistência e do módulo de elasticidade.

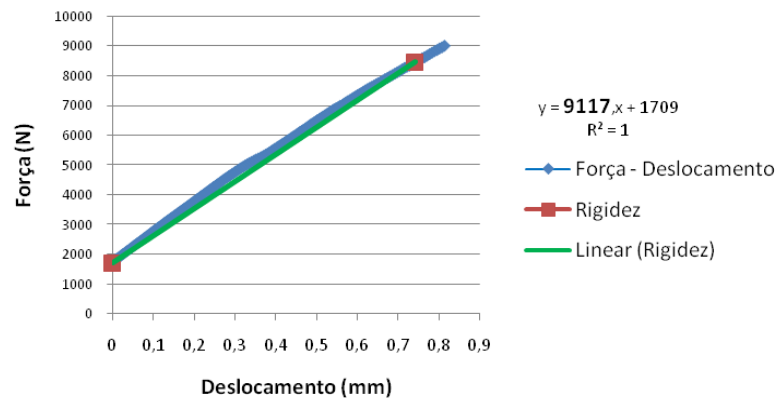


Fonte: Autor.

Gráfico 2 – Resistência da ligação MN



Fonte: Autor

Gráfico 3 – Rigidez da ligação MN

Fonte: Autor

4.2.2 Inserção de Elementos Flexibilizadores

Conforme descreve Brantseva *et al.* (2016, p.1), pode-se fazer uso da inserção de termoplásticos à resina buscando contribuir na melhoria da sua resistência à fratura e no desempenho ao impacto.

Assim, foi identificada a resina flexível do sistema SQ 2220/SQ 3154, do mesmo fornecedor da resina já utilizada. Essa resina pode ser inserida e misturada à receita original, melhorando as propriedades do compósito.

Na literatura consultada, há referências quanto aos percentuais de mistura entre tipos de resina diferentes, com o objetivo de atender a alguma demanda de pesquisa. Porém, como existe um universo de tipos de resinas, de usabilidades desejadas e de possíveis combinações e receitas, cabe ao próprio pesquisador estabelecer o melhor percentual para atender a sua demanda.

Assim, foram elaboradas amostras (figura 23) com a inserção de 10%, 30%, 50% e 70% do percentual total de resina no compósito com a resina do sistema flexível SQ 2220 / SQ 3154. Essas amostras foram de apenas três peças, acreditando que – dessa forma e naquele momento da pesquisa – obteríamos informações suficientes para definir qual o melhor percentual a ser inserido.

Figura 23 - Elaboração de cavilhas com percentuais variados de resina flexível (10%, 30%, 50% e 70 %)



Fonte: Autor.

Por fim, uma receita intermediária apresentada no anexo 9, com 60% do total de resina e com a resina flexível do sistema SQ 2220 / SQ 3154, foi definida como padrão para a elaboração das cavilhas a serem utilizadas no segundo nível de ensaios.

No ensaio da fase 2, com o objetivo de avaliar o desempenho das ligações em estruturas de madeira, com conector do tipo cavilha, seja no sentido normal (figura 24), ou no paralelo às fibras (figura 25); confeccionadas em madeira e com compósito polimérico, referenciados pela norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

Figura 24 - Ensaio de fase 2 - Normal às fibras, com cavilhas de madeira e de compósito



Fonte: Autor

Figura 25 - Ensaio de fase 2 – Paralelo às fibras com cavilhas de madeira e de compósito



Fonte: Autor

4.2.3 Confeção das Cavilhas de Madeira

A madeira utilizada para elaboração das cavilhas (figuras 26 e 27) da fase 1 foi a madeira de Jatobá, adquirida em madeireira da cidade de Araçongas/PR. Essa, é representada por apenas um pedaço encontrado em meio a outras madeiras de espécie diferentes, no padrão de umidade e livre de defeitos – conforme solicita a norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

Figura 26 - Madeira de Jatobá utilizada para confeccionar cavilhas para ensaio da fase 1



Fonte: Autor

Figura 27 - Cavilhas de Jatobá para ensaio da fase 1



Fonte: Autor

Além dessa classificação, realizou-se o cálculo da densidade das cavilhas elaboradas, obtendo como valor médio 1085 kg/m^3 no percentual de umidade

exigido. Esse dado foi demonstrado em planilha no anexo 4, o qual se enquadra no anexo E, na tabela E.2 da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

Já para as demais cavilhas utilizadas na fase 2, por ser em maior quantidade, a madeira inicial não era suficiente; e, em uma nova busca para aquisição, não mais encontramos a respectiva espécie de madeira.

Assim, a alternativa dentre outras quatro espécies encontradas (figura 28), foi a de *Corymbia Citriodora*, porém enquadrada na classe C 40 de resistência; e ainda, com a possibilidade de ser uma madeira proveniente de reflorestamento.

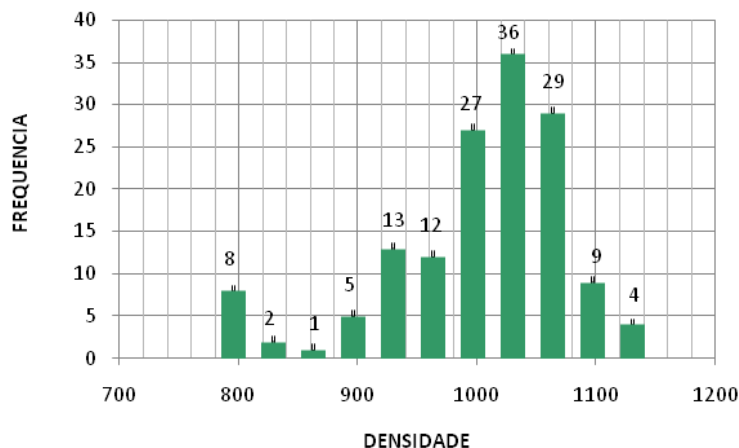
Figura 28 - Tipos diferentes de madeira testados para elaboração das cavilhas da fase 2



Fonte: Autor

Porém, mesmo assim houve dificuldade para a respectiva classificação, pois em um único pedaço da madeira foram encontradas variações na densidade das cavilhas elaboradas. No gráfico 2, é possível verificar sua oscilação de 729 Kg/m³ até 1130 Kg/m³. Na tabela 21, disposta no anexo 17, é possível visualizar na íntegra as características de cada uma das respectivas cavilhas, sendo que apenas as de maior densidade foram utilizadas na montagem dos corpos de prova.

Gráfico 4 - Variação da densidade das cavilhas de madeira com 64 mm de comprimento



Fonte: Autor.

No gráfico 4, também é possível identificar a variação das densidades obtidas entre as cavilhas de madeira, enquadradas no percentual de umidade de 12%, com comprimento de 64 mm. Identifica-se que há uma maior concentração de elementos com densidade a partir de 996 kg/m³ até 1063 kg/m³; ou seja, 92 unidades ou 63% do total de elementos. Para a montagem dos corpos-de-prova, utilizou-se deste volume de cavilhas e das demais com densidade superior, até o limite máximo de 1130 kg/m³.

Referenciado pela norma ASTM D 8023-17 (ASTM, 2017), define-se, entre outros elementos, o diâmetro mínimo das cavilhas em 1/2 polegada (12,7 mm) e o comprimento mínimo de quatro vezes o seu diâmetro. Isso em detrimento à norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997), que limita o uso de cavilhas com diâmetros de 16 mm, 18 mm e 20 mm. Pois, além de desviar o foco do pesquisador em estudar ligações com cavilhas em estruturas de menor porte - mobiliário, por exemplo - essas cavilhas consumiriam volume maior de material para sua elaboração. Conseqüentemente, os corpos de prova também seriam maiores, já que suas dimensões são definidas pelo diâmetro das cavilhas.

Para a norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997), as cavilhas devem ser torneadas (figura 29). Nesse sentido, houve a tentativa de executá-las em um torno copiador. Porém, como o diâmetro de 1/2 polegada era considerado pequeno para o equipamento e o operador não tinha conhecimento da técnica de deixar volume de material nas extremidades, estas acabavam apresentando fedilhamento (figura 30), inutilizando-as.

Figura 29 - Técnica de tornear para obter as cavilhas de madeira



Fonte: Autor

Figura 30 - Peças torneadas para conformação das cavilhas apresentando fedilhamento.



Fonte: Autor

Além disso, o respectivo processo não garantia a dimensão do diâmetro padrão em toda a extensão da cavilha, o que determinou a reprovação da técnica e das respectivas cavilhas.

O passo seguinte foi identificar tornos automáticos que garantissem o dimensionamento desejado, porém os que estavam disponíveis nas empresas - utilizados para elaboração de cavilhas de uso comum no mercado - eram ferramentas para executar produtos com diâmetro máximo de 10 mm. O custo da ferramenta nova apropriada para a dimensão desejada, o setup de troca e o volume de peças a serem confeccionadas, inviabilizava a confecção da respectiva ferramenta.

A alternativa, então, foi resgatar uma técnica artesanal de elaboração de cavilhas. Esta se assemelha a um processo de extrusão, usando como ferramenta uma placa de aço também denominada de matriz (figura 31). Essa ferramenta possui, originalmente, cinco orifícios de diâmetros diversos, sendo que três deles foram retificados com o diâmetro de 12,7 mm (figura 32).

Figura 31 - Matriz para confecção das cavilhas de madeira



Fonte: Autor.

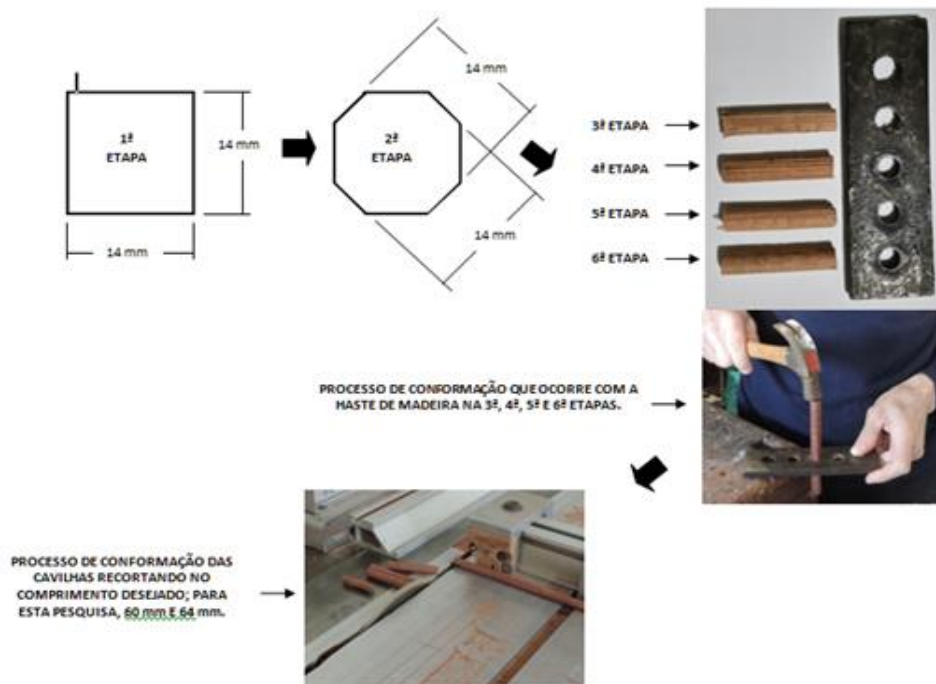
Figura 32 - Retifica da matriz para extrusão das cavilhas de madeira



Fonte: Autor.

Nesse processo de confecção das cavilhas, a madeira é refilada, partindo-se inicialmente de uma secção quadrada com 14 mm (1ª etapa) por um comprimento aproximado de 600 mm. Na sequência, passa por nova usinagem e se transforma numa secção octogonal (2ª etapa). A partir desta, complementa-se o processo de conformação utilizando-se a matriz e executando a 3ª, 4ª, 5ª e 6ª etapas (figura 33) até tornar-se uma haste cilíndrica, com o diâmetro desejado. Após, basta cortá-la no comprimento desejado – no caso, 64 mm para elaboração dos corpos de prova da fase 2. Utilizou-se o laboratório de máquinas para madeira do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), em Arapongas/PR, para elaborá-las.

Figura 33 - Etapas do processo de conformação das cavilhas



Fonte: Autor.

4.2.4 Confeção das Peças de Madeira para Corpos de Prova

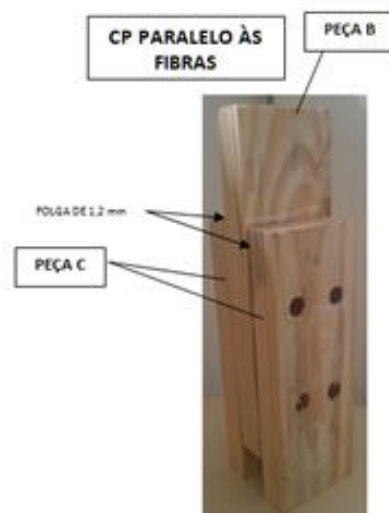
As peças de madeira para confecção dos corpos de prova, denominadas no item 4.1.1 - Madeiras, tanto para a fase 1 (figura 34) como para a fase 2 de ensaios – paralelo às fibras (figura 35) e normal às fibras (figura 36) – foram também elaboradas no laboratório de máquinas para madeira do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) em Arapongas/PR.

Figura 34 - Corpo de prova fase 1



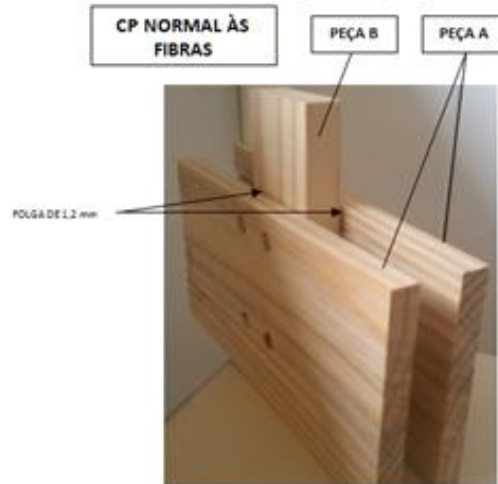
Fonte: Autor.

Figura 35 - Corpo de prova fase 2 – ensaio paralelo às fibras



Fonte: Autor.

Figura 36 - Corpo de prova fase 2 - ensaio normal às fibras



Fonte: Autor.

A madeira utilizada para a confecção das peças foi a de *Pinus taeda* proveniente de reflorestamento, com módulo de elasticidade médio de 13.304 MPa, segundo anexo E, na tabela E.3 da NBR 7190:97.

A madeira foi adquirida de um único lote (figura 37), como solicita a norma NBR 7190:97. Elaborou-se uma quantidade significativa de peças, para atender à amostra inicial desejada e posterior exclusão, seja no momento da própria usinagem (figura 38) como de muitas outras na etapa de classificação propriamente dita (figura 39).

Figura 37 - Parte da madeira de um lote utilizada para elaboração dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

Figura 38 - Parte das madeiras desclassificadas durante processo de usinagem



Fonte: Autor.

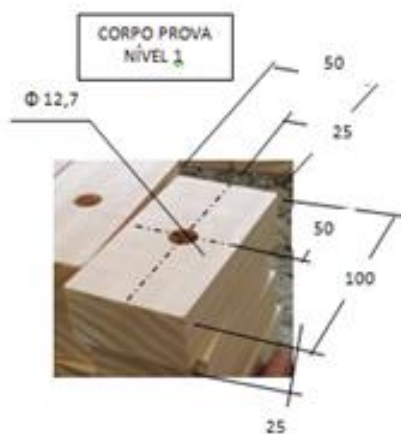
Figura 39 - Madeiras desclassificadas durante processo por ultrassom e visual



Fonte: Autor.

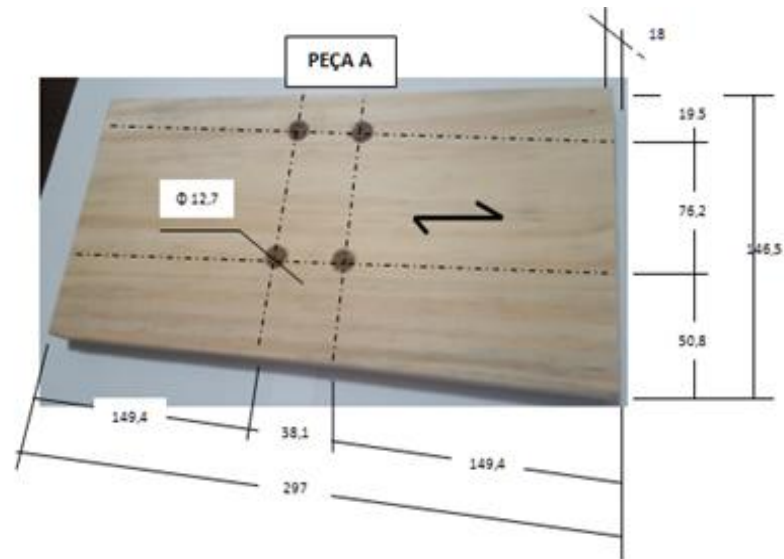
Operações tradicionais de beneficiamento da madeira foram realizadas, como desempenar a face e canto, refilar nas dimensões em bruto e desengrossar, deixando na secção desejada. Além disso, executar o corte no comprimento para o corpo de prova da fase 1 (figura 40) ou para as peças a serem utilizadas na montagem dos corpos de prova da fase 2 (figuras 41, 42 e 43).

Figura 40 - Peça para corpo de prova fase 1



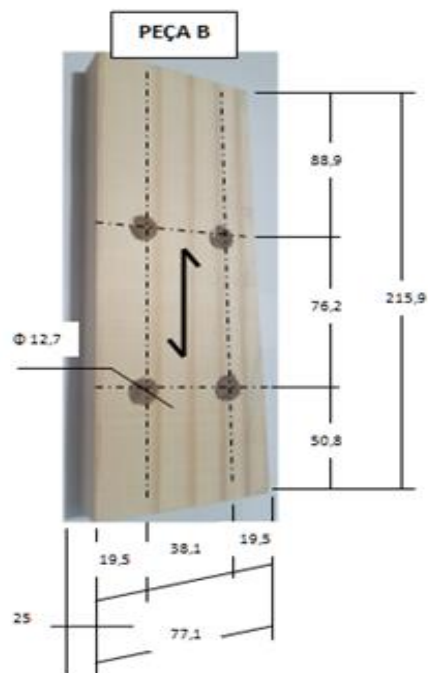
Fonte: Autor

Figura 41 - Peça 'A' para compor corpo de prova de ensaio normal às fibras



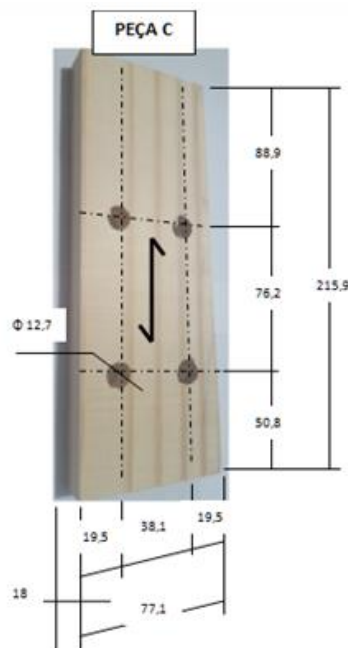
Fonte: Autor

Figura 42 - Peça 'B' para compor corpo de prova do ensaio normal e paralelo às fibras



Fonte: Autor

Figura 43 - Peça 'C' para compor corpo de prova para ensaio paralelo às fibras



Fonte: Autor.

As dimensões utilizadas para cada peça do corpo de prova respeitaram a orientação do item 8.6.1 – espaçamentos em ligações com pinos (pregos com pré-furação, parafusos e cavilhas) – descritos na norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997), possuindo como referência o diâmetro da cavilha de 12,7 mm.

Quanto à espessura das peças do corpo de prova, definiu-se a peça 'B' como a principal da ligação com 25 mm e as secundárias 'A' e 'C' com 18 mm. Sendo que a referência para essa definição foi o item 10.2.1 – dimensões mínimas das seções transversais, da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

Optou-se por confeccionar corpos de prova em corte duplo, em detrimento ao corte simples. Isso foi feito considerando o exposto na norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997), na qual descreve-se que as ligações de estruturas com cavilha em corte simples só podem ser utilizadas em ligações secundárias, o que limitaria a futura utilização dos possíveis resultados desta pesquisa.

Além de medir o percentual de umidade (figura 44) e pesar as peças já nas dimensões finais, permitindo efetuar o cálculo da densidade, complementou-se com a realização do ensaio não destrutivo por ultrassom (figuras 45 e 46). Este, realizado com o objetivo de identificar o módulo de elasticidade (MOE) das referidas peças e poder contribuir na classificação, cujos resultados médios apresentam-se na

tabela 1. O uso desse ensaio citado, também foi feito para atender à solicitação da norma NBR 7190:97 no item 10.6 – classificação de peças, que não permite que as classificações das madeiras de primeira sejam feitas apenas por meio do método visual de classificação (ABNT, 1997).

Considerando que os transdutores do respectivo aparelho tinham 30 mm de diâmetro e a maior espessura das peças era de 25 mm; então, para evitar erros na análise dos dados, estes foram ajustados com fórmula específica, para posterior uso da informação.

Figura 44 - Aparelho para medir percentual de umidade das madeiras utilizadas, nas diversas etapas da pesquisa.



Fonte: Autor.

Figura 45 - Aparelho de Ultrassom AGRICEF USLab.



Fonte: Autor.

Figura 46 - Classificação das madeiras para confecção dos corpos de prova com auxílio do aparelho de Ultrassom



Fonte: Autor.

Tabela 1 - Valores médios de referência obtidos durante ensaio não destrutivo de Ultrassom, no universo de peças elaboradas, passíveis de utilização para confecção dos corpos de prova da fase 2

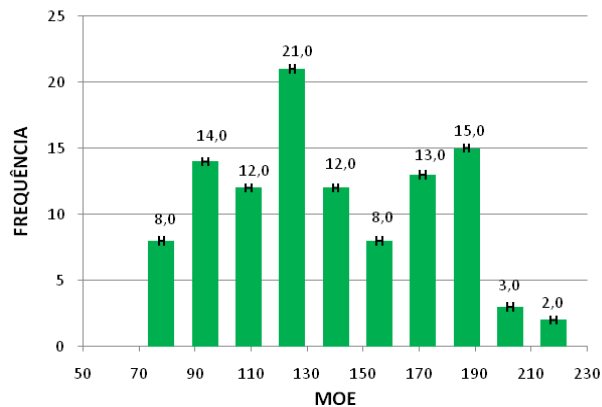
Peça	Quantidade de peças	Peso (kg)	Volume (m ³)	Densidade (kg/m ³)	Umidade (%)	*Módulo de elasticidade - MOE (mpa)	Desvio padrão do MOE (%)	Coefficiente de variação do MOE (%)
A	108	0,367	0,00078	469,2	10,9	110,4	31,7	29
B	107	0,201	0,00041	481,9	11,0	108,8	17,9	16
C	190	0,139	0,00030	462,4	10,6	94,3	22,6	24

*Valores cálculos decorrente da dimensão superior do transdutor em relação espessura da madeira

Fonte: Autor.

Nos gráficos 5, 6 e 7 é possível verificar a variação no módulo de elasticidade para cada peça.

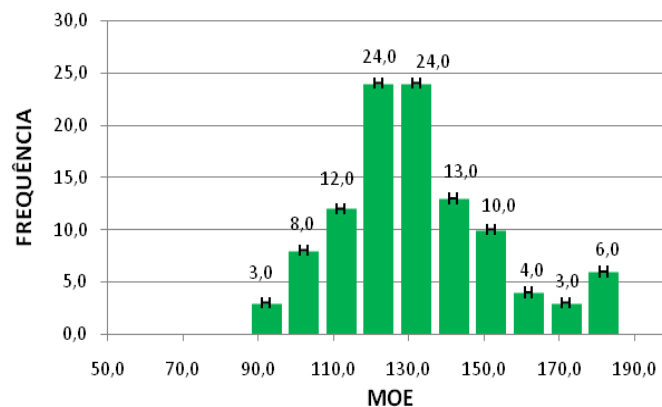
Gráfico 5 - Variação do módulo de elasticidade das peças 'A', para elaboração dos corpos de prova da fase 2



Fonte: Autor.

No gráfico 5, referente à variação no módulo de elasticidade da peça 'A' a ser utilizada para compor os corpos de prova da fase 2, com dimensões 297 mm x 146,5 mm x 18 mm, dois percentuais significativos de variação do MOE foram apresentados que, somados, representam 65,7% dos dados. Um, representando uma frequência de 30,5%, entre os valores de 124,6 MPa e 140,2 Mpa e, o outro, representando uma frequência de 35,2% dos dados apurados, entre os valores de 171,3 MPa e 186,8 MPa, totalizando 71 peças. Assim como apresentaram o conjunto de peças elaboradas com essa dimensão, o coeficiente de variação do módulo de elasticidade é de 29%.

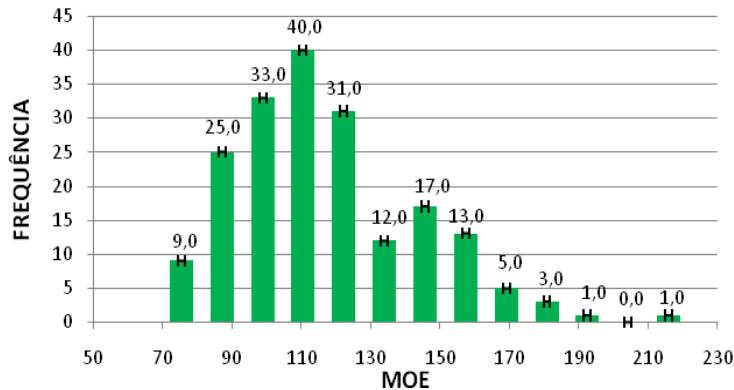
Gráfico 6 - Variação do módulo de elasticidade das peças 'B', para elaboração dos corpos de prova da fase 2



Fonte: Autor.

No gráfico 6, referente à variação no módulo de elasticidade da peça 'B' a ser utilizada para compor os corpos de prova da fase 2, com dimensões 215,9 mm x 77,1 mm x 25 mm, apresentou-se duas classes de frequência que se destacaram – com 48% do total de dados apurados e valores expressos entre 121,9 MPa e 131,9 MPa. Também próximas a estas, duas outras classes – uma pontuada em 112 MPa e a outra em 141,8 MPa – totalizando 73 peças. Isso em uma faixa média do módulo de elasticidade referenciado pela norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997). Assim como apresentaram o conjunto de peças elaboradas com esta dimensão, o coeficiente de variação do módulo de elasticidade é de 16%.

Gráfico 7 - Variação do módulo de elasticidade das peças 'C', para elaboração dos corpos de prova da fase 2



Fonte: Autor.

No gráfico 7, referente à variação no módulo de elasticidade da peça 'C' a ser utilizada para compor os corpos de prova da fase 2, com dimensões 215,9 mm x 77,1 mm x 18 mm, apresentou-se um agrupamento de frequência de quatro classes, representando 67,9% do total de dados apurados. Valores esses expressos entre 87,0 MPa e 122,2 MPa, totalizando 129 peças numa faixa abaixo da média do módulo de elasticidade referenciado pela norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997). Assim como apresentaram o conjunto de peças elaboradas com esta dimensão, o coeficiente de variação do módulo de elasticidade é de 24%.

Na etapa seguinte, de classificação visual, trabalhou-se com os critérios no nível da classe estrutural especial (EE), pois desejava-se garantir que as peças oferecessem valores elevados de resistência e rigidez.

Sendo uma Conífera, utilizou-se como orientação o manual de classificação visual de peças estruturais de madeira tipo Pinus (figuras 4 e 5), elaborado por *Moura et al.* (2012).

Nesta classificação reduziu-se o volume de peças disponíveis e em condições para a confecção dos corpos de prova, destacando-se como características de reprovação:

- 1) A classificação como madeira densa e não-densa
- 2) A presença de furos de insetos inativos
- 3) Galerias
- 4) Medula

- 5) Madeira ardida
- 6) Mancha azul / química
- 7) Nós – destacando que estes já foram identificados e excluídos das peças no processo de usinagem.

4.2.5 Confeção das Cavilhas de Compósito

As cavilhas pré-fabricadas de compósito foram elaboradas a partir do dimensionamento dos seus componentes (receitas) e seguindo método descrito em protocolo. Ambos constam nos anexos listados na sequência:

- Anexo 8: Receita para elaboração das cavilhas de compósito – 6,0 cm x 1,27 cm - Sistema de resina epóxi SQ 2001 / SQ 3154
- Anexo 9: Receita para elaboração de cavilhas de compósito – 6,4 cm x 1,27 cm - Sistema de resina epóxi SQ 2001 / SQ 3154 e SQ 2220 / SQ 3154
- Anexo 6: Protocolo para elaboração de cavilhas pré-fabricadas de compósito (60 mm)- (sistema SQ 2001 / SQ 3154).
- Anexo 7: Protocolo para elaboração de cavilhas pré-fabricadas de compósito (64mm) – (sistema SQ 2001 / SQ 3154 e SQ 2220 / SQ 3154)

De 100% do volume das cavilhas pré-fabricadas de compósito, 40% são do elemento estrutural (fibra de vidro particulada) e os outros 60% são do elemento matriz (resina epóxi).

Pois, segundo Vojdani, Rezaei e Zareeian (2008 apud SOARES, 2010) em estudo realizado com fibras de vidro picadas, verificou que há necessidade de equilibrar o volume de fibra com a matriz polimérica, o que não acontece em grandes concentrações de fibra, determinando a redução da resistência do compósito.

Mexendo a mistura de resinas do sistema SQ 2001 e SQ 2220 com a fibra de vidro por 3 minutos. Esse processo de mistura deve ser realizado de forma constante e suave para evitar quebrar as fibras, e obtendo-se uma mistura homogênea.

Para as cavilhas da fase 1, desse percentual de 60% de resina, 100% são do sistema de resina epóxi SQ 200/SQ 3154. Neste, utiliza-se a proporção de 2 partes de resina para 1 parte, em peso, do endurecedor SQ 3154.

Também citam Cranker e Breslau (1956, p. 98) que as propriedades mecânicas das resinas epoxídicas são ampliadas com a melhoria no processo de cura. Para isso, sugere o uso dos polímeros líquidos que contém grupo mercaptana, como é o caso do polissulfeto que, quando usado, acaba por ser intercalado ao longo da cadeia de epóxi, reduzindo o tempo de cura e conferindo maior flexibilidade.

Assim, houve o fracionamento no componente matriz do compósito, agregando o sistema de resina flexível SQ 2220/SQ 3154 para que esta se aproximasse às características das madeiras.

Para identificar o percentual de resina flexível que deveria ser inserido ao compósito, confeccionou-se três amostras de cavilhas de compósito para cada nova receita. Nessa, a parte de resina epóxi (60%) foi elaborada com percentuais que variaram de 10%, 30%, 50% à 70%, com sistema de resina SQ 2220/SQ 3154 ou resina epóxi flexível cujas receitas encontram-se no anexo 10.

Considerando os resultados obtidos com as cavilhas de compósito com 50% e 70% e, concluindo precipitadamente que entre esses percentuais os melhores resultados seriam alcançados, optou-se por utilizar o percentual intermediário de 60% dessa resina.

Para as cavilhas da fase 2, do percentual de 60% de resina, 40% são do sistema de resina epóxi SQ 2001/SQ 3154 e, os demais 60%, do sistema de resina epóxi flexível SQ 2220/SQ 3154. Também utilizando a proporção de 2 partes de resina para 1 parte, em peso, do endurecedor SQ 3154.

A partir das receitas e dos protocolos específicos, parte das cavilhas foram elaborada nos laboratórios do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UEL – Universidade Estadual de Londrina (figura 47). Já a outra parte, no laboratório da unidade do SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, em Arapongas (figura 48).

Figura 47 - Laboratório da Universidade Estadual de Londrina (UEL)



Fonte: Autor.

Figura 48 - Laboratório da unidade do SENAI em Araçongas



Fonte: Autor.

Esses componentes, considerando a receita para 60% de resina flexível ao percentual total de resina do compósito, foram separados e gradativamente misturados. Iniciou-se pela pesagem com o uso de balança de precisão, elaborando as amostra em porções individuais, garantindo o padrão entre elas (figura 49).

Figura 49 - Pesagem dos componentes em balança de precisão



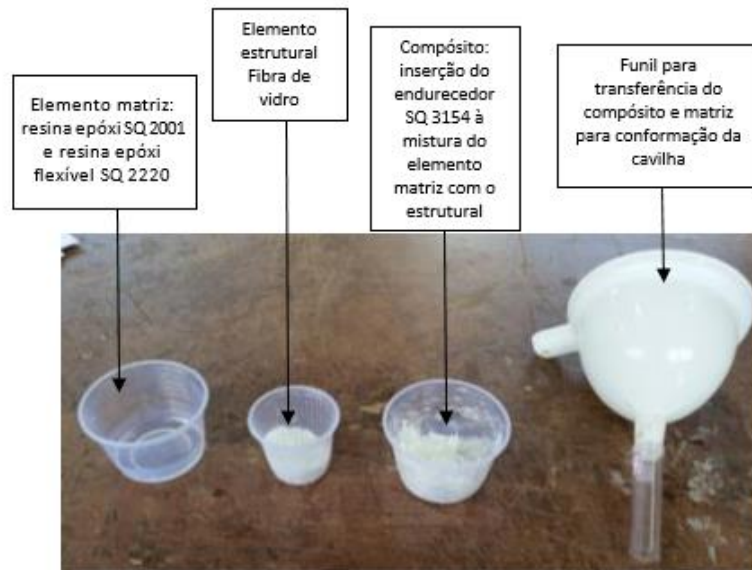
Fonte: Autor.

Na sequência, os elementos foram misturados seguindo o que foi definido no protocolo para elaboração. Inicialmente, com a resina SQ 2001 inserida à resina SQ 2220 nas quantidades específicas e misturadas homogeneamente no tempo definido. Após, a fibra foi inserida – também na quantidade e no tempo de mistura

definidos – e, por último, o endurecedor foi adicionado e misturado aos demais itens, respeitando o tempo de mistura.

Essa ordem foi seguida considerando o início da reação química entre os elementos (resinas com o endurecedor) e a limitação do tempo para inserção posterior dos demais elementos, obtendo-se como resultado uma mistura consistente (figura 50).

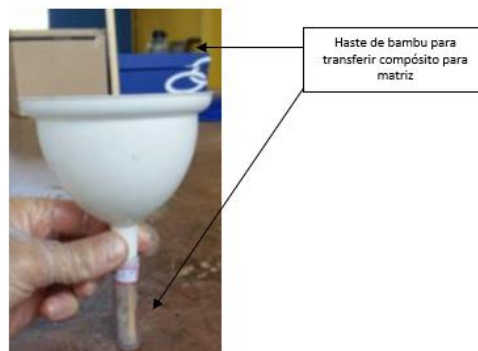
Figura 50 - Processo de elaboração das cavilhas de compósito



Fonte: Autor.

Na sequência à preparação da mistura do compósito, o material foi transferido para o interior da matriz com o uso de um funil – cuja extremidade foi ajustada para encaixar-se na matriz; e de forma gradativa, com o auxílio de um guia, levemente compactando o compósito para que todo o volume preparado coubesse na matriz (figura 51).

Figura 51 - Compósito preparado e sendo inserido na matriz com auxílio de funil



Fonte: Autor.

A próxima ação e a precaução a serem adotadas foi no processo de cura, respeitando o período indicado pelo fornecedor de 7 dias. As matrizes foram colocadas numa prateleira, devidamente identificadas e em ambiente com temperatura constante acima de 20°C (figura 52), para aguardar a cura.

Figura 52 - Ciclo de cura das cavilhas de compósito



Fonte: Autor.

Após ter completado o ciclo de cura, que ocorreu em lotes correspondentes à data de confecção das cavilhas, retiraram-se as mesmas da matriz (figura 53 e 54).

Figura 53 - Processo de retirar as cavilhas de compósito das matrizes



Fonte: Autor.

Figura 54 - Conjunto de cavilhas elaboradas para ensaios, estando algumas já fora das matrizes



Fonte: Autor.

Fora das matrizes, as cavilhas tiveram sua identificação de rastreabilidade garantida e seu diâmetro conferido (figura 55). Nessa etapa, foram encontradas pequenas variações no diâmetro, provavelmente em decorrência da expansão das paredes da mangueira da matriz ao produto ser compactado dentro destas.

Figura 55 - Conferencia das dimensões das cavilhas após a cura



Fonte: Autor.

Após algumas etapas, percebeu-se que, naquele momento, um procedimento poderia ser realizado – a retífica das cavilhas de compósito. Isso, utilizando a mesma técnica de elaboração das cavilhas de madeira, deixando-as com diâmetro uniforme (figura 56).

Figura 56 - Simulação do processo de retífica das cavilhas de compósito



Fonte: Autor.

As matrizes foram elaboradas em mangueira plástica (figura 57), cujo diâmetro interno era de 12,7 mm. Embora existindo duas espessuras de parede externa destas, optou-se pela mais fina, levando em consideração a posterior facilidade para retirar as cavilhas da referida matriz. A retirada ocorria com uso de estilete e alicates, evitando o contato direto com as mãos por apresentar arestas pontudas, decorrentes do endurecimento da fibra de vidro pela resina.

Figura 57 - Característica inicial da mangueira, gerando peças levemente curvas.



Fonte: Autor.

Essa alternativa atendeu às expectativas, porém, o processo de elaboração destas dependia do pré-corte das matrizes, inicialmente com medida 10 mm superior à desejada.

Posteriormente os pedaços de mangueira foram alocados de molho em água quente (figura 58), retirando-as na seqüência e fazendo movimentos de avanço e de retrocesso sobre a superfície reta de um tampo em granito. Isso foi feito visando que esfriassem e ficassem retilíneas, considerando que na sua embalagem original adquiriam certo raio de curvatura.

Figura 58 - Processo de tornar matrizes retas



Fonte: Autor.

Depois, obtinha-se o comprimento final de 60 mm (para corpo de prova da fase 1) e 64 mm (para corpo de prova da fase 2) através do recorte em um gabarito (figura 59), deixando as faces retas e perpendiculares em relação à face lateral externa da matriz (mangueira). Por fim, as matrizes receberam fita adesiva em uma

das extremidades, conformando uma espécie de fundo para que o compósito inserido não saísse da matriz

Figura 59 - Mangueira plástica para elaboração das matrizes para elaboração das cavilhas



Fonte: Autor.

4.2.6 Montagem dos Corpos de Prova

A montagem dos corpos de prova da fase 1 se limitava à inserção da cavilha no orifício da madeira, posicionando-a no meio desta. Já para a montagem dos corpos de prova da fase 2, envolvendo a integração de três peças, foram seguidas as orientações do anexo C da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997), pontualmente o item C.5.3 – Amostras.

Esse item descreve que haja um espaçamento para evitar o engrenamento entre as peças. Assim, confeccionaram-se separadores metálicos com 1,2 mm de espessura, para ajudar na montagem e garantir essa solicitação (figura 60).

Figura 60 - Espaçadores de aço para evitar o engrenamento entre as peças



Fonte: Autor.

Assim como na inserção das cavilhas, metade destes foram colocados a partir de uma face do corpo de prova e a outra metade a partir da face oposta (figuras 61 e 62).

Figura 61 - Montagem do corpo de prova normal às fibras, com cavilhas de madeira, inserindo estas através dos dois lados e com uso dos separadores.



Fonte: Autor.

Figura 62 - Montagem do corpo de prova paralelo às fibras, com cavilhas de madeira, inserindo estas através dos dois lados e com uso dos separadores.



Fonte: Autor.

A intenção inicial para esse processo de montagem era a elaboração de 13 corpos de prova para cada situação a ser estudada. Porém alguns corpos de prova apresentaram rachaduras durante a própria montagem (figura 63), fazendo com que fossem desconsiderados. Isso foi feito atendendo à própria especificação do item 10.4.1 da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997, que não permite a presença de lascamentos, nós, rachaduras ou outros defeitos que comprometam os resultados.

Figura 63 - Corpos de prova descartados ao apresentarem defeitos.



Fonte: Autor.

Nas tabelas 2, 3, 4 e 5, é possível rastrear todos os corpos de prova que foram elaborados para cada configuração: paralelo às fibras da madeira com cavilhas de madeira e com cavilhas de compósito ou normal às fibras, também com

cavilhas de madeira e de compósito. Da mesma maneira que as respectivas cavilhas que foram inseridas em cada um deles.

Tabela 2 - Rastreabilidade da amostra dos corpos de prova normal às fibras com cavilhas de compósito

PEÇAS PARA CORPO DE PROVA NORMAL ÀS FIBRAS - NÍVEL 2 - COM CAVILHAS DE COMPOSITO																	
CP	PEÇA 'A'			PEÇA 'A'			PEÇA 'B'			CAVILHA COMPOSITO							
	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.
1 CN	40	123	105	48	121	103	21	129	110	22	1503	14	1490	107	1582	42	1512
2 CN	4	120	102	51	117	99	54	120	102	34	1592	25	1523	35	1520	61	1596
3 CN	71	153	130	46	154	131	77	130	111	69	1593	21	1543	83	1673	7	1526
4 CN	104	129	110	50	130	111	95	112	95	65	1591	59	1573	53	1549	91	1614
5 CN	108	144	122	112	140	119	38	139	118	89	1524	79	1513	86	1596	3	1475
6 CN	15	160	136	45	158	134	30	158	134	62	1561	73	1581	46	1574	95	1543
	MÉDIA	138	87		137	117		131	112				MÉDIA				1 556
	DESV. PADRÃO	16,6	45,1		16,0	13,6		16,0	13,6				DESV. PADRÃO				45,8
	COEF. VARIAÇÃO	0,12	0,52		0,12	0,12		0,12	0,12				COEF. VARIAÇÃO				0,03

*Valores corrigidos em decorrência da dimensão do transdutor em relação à espessura das peças

Fonte: Autor.

Tabela 3 - Rastreabilidade da amostra dos corpos de prova normal às fibras com cavilhas de madeira

PEÇAS PARA CORPO DE PROVA NORMAL ÀS FIBRAS - NÍVEL 2 - COM CAVILHAS DE MADEIRA																	
CP	PEÇA 'A'			PEÇA 'A'			PEÇA 'B'			CAVILHA MADEIRA							
	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.
1 MN	57	183	156	39	180	153	13	146	124	34	1104	44	1130	62	1040	61	1025
2 MN	124	175	149	81	113	96	115	130	111	140	1095	139	1040	125	1020	123	1007
3 MN	102	128	109	54	128	109	92	133	113	109	1045	116	1064	21	1026	22	1057
4 MN	56	147	125	84	149	127	100	153	130	41	1042	51	1037	52	927	55	1025
5 MN	109	140	119	113	135	115	65	131	111	97	1004	91	947	92	931	110	1081
6 MN	66	172	146	43	172	146	91	109	93	111	1002	113	1029	144	935	57	1045
	MÉDIA	158	110		152	129		134	114				MÉDIA				1 027
	DESV. PADRÃO	22,2	34,5		23,8	20,2		15,2	12,9				DESV. PADRÃO				52,5
	COEF. VARIAÇÃO	0,14	0,31		0,16	0,16		0,11	0,11				COEF. VARIAÇÃO				0,05

*Valores corrigidos em decorrência da dimensão do transdutor em relação à espessura das peças

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Rastreabilidade da amostra dos corpos de prova paralelo às fibras com cavilhas de compósito

PEÇAS PARA CORPO DE PROVA PARALELO ÀS FIBRAS - NÍVEL 2 - COM CAVILHAS DE COMPÓSITO																	
CP	PEÇA 'C'			PEÇA 'C'			PEÇA 'B'			CAVILHA DE COMPÓSITO							
	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	MOE (Mpa)	*MOE (Mpa)	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.
1 CP	110	143	122	138	124	105	56	120	102	70	1703	76	1676	2	1575	84	1540
2 CP	120	101	86	181	102	87	121	126	107	74	1658	28	1519	104	1682	31	1544
3 CP	93	116	99	151	115	98	98	136	116	13	1574	51	1464	101	1631	12	1424
4 CP	64	112	95	139	110	94	66	125	106	72	1648	96	1533	27	1611	94	1482
5 CP	2	140	119	154	140	119	43	128	109	71	1638	87	1569	6	1545	108	1700
6 CP	53	148	126	100	142	121	5	161	137	19	1310	98	1697	63	1533	106	1724
	MÉDIA	127	91		124	106		133	113					MÉDIA			1 583
	DESV. PADRÃO	19,4	36,1		17,2	14,7		14,8	12,6					DESV. PADRÃO			100,8
	COEF. VARIAÇÃO	0,15	0,40		0,14	0,14		0,11	0,11					COEF. VARIAÇÃO			0,06

*Valores corrigidos em decorrência da dimensão do transdutor em relação à espessura das peças

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Rastreabilidade da amostra dos corpos de prova paralelo às fibras com cavilhas de madeira

PEÇAS PARA CORPO DE PROVA PARALELO ÀS FIBRAS - NÍVEL 2 - COM CAVILHAS DE MADEIRA																	
CP	PEÇA 'C'			PEÇA 'C'			PEÇA 'B'			CAVILHA DE MADEIRA							
	NÚMERO	MOE	*MOE (Mpa)	NÚMERO	MOE	*MOE (Mpa)	NÚMERO	MOE	*MOE (Mpa)	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.	NÚMERO	DENS.
1 MP	2	191	162	58	101	86	108	131	111	53	987	65	922	76	1043	94	1014
2 MP	60	158	134	126	104	88	112	140	119	16	1035	30	1049	103	1093	75	1078
3 MP	16	152	129	102	148	126	75	161	137	68	1058	102	1041	66	1041	47	1015
4 MP	21	140	119	54	142	121	69	137	116	31	1033	135	1056	115	1091	136	1099
5 MP	31	155	132	113	154	131	123	163	139	60	1063	81	1033	133	921	118	979
6 MP	179	139	118	86	136	116	35	123	105	14	1001	18	1017	19	1069	100	1041
	MÉDIA	156	92		143	122		143	121					MÉDIA			1 032
	DESV. PADRÃO	18,9	61,4		23,9	20,3		16,2	13,8					DESV. PADRÃO			46,2
	COEF. VARIAÇÃO	0,12	0,66		0,17	0,17		0,11	0,11					COEF. VARIAÇÃO			0,04

*Valores corrigidos em decorrência da dimensão do transdutor em relação à espessura das peças

Fonte: Autor.

4.2.7 Aparelhos de Carregamentos e Base Metálica

Para as cavilhas da fase 1 de ensaios, usou-se como referência a norma ASTM D 5764:97a (ASTM, 2018). Portanto, foram elaboradas cavilhas com 60 mm de comprimento para poder apoiar o aparelho de carregamento (figura 64 e 65), confeccionado seguindo projeto disponível no anexo 4, que é caracterizado pela personalização do respectivo ensaio e por não estar disponível com o equipamento de ensaio.

Figura 64 - Usinagem do aparelho de carregamento utilizado na fase 1 de ensaios



Fonte: Autor

Figura 65 - Aplicação do aparelho de carregamento utilizado na fase 1 de ensaios



Fonte: Autor.

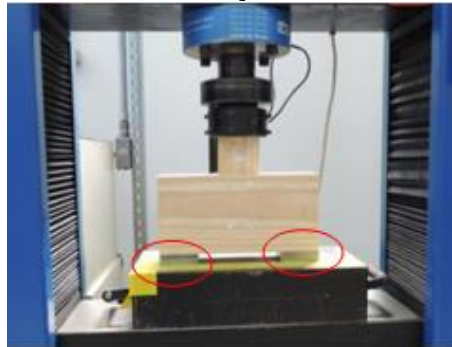
Para possibilitar os ensaios dos corpos de prova da fase 2, no sentido normal às fibras, houve a necessidade da elaboração de duas bases metálicas (figura 66 e 67). Essas foram dimensionadas segundo descrição da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997, no item C.5.2, na figura C.4 – corpos de prova para ensaios de ligações mecânicas.

Figura 66 - Bases metálicas elaboradas para dar sustentação ao corpo de prova



Fonte: Autor

Figura 67 - Local de utilização das bases metálicas



Fonte: Autor.

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

4.3.1 Normas

Para definição da amostragem, realização dos ensaios e análise dos resultados, orientou-se pelas seguintes normas:

- Na fase1: ASTM D 5764–97 a (ASTM, 2018): Standart test method for Evaluating dowel-bearing strength of Wood and Wood-based products e NBR 7190:97- Projeto de estrutura de madeira;
- Na fase 2: NBR 7190:97 (ABNT, 1997): Projeto de estrutura de madeira.

4.3.2 Protocolo de Ensaios e Amostragem

Os protocolos de ensaios – para que os equipamentos pudessem ser programados e os respectivos ensaios realizados – foram referenciados seguindo determinadas normas. Nos ensaios da fase 1, guiou-se pela norma ASTM D 5764-97a (ASTM, 2018), cujo protocolo é descrito no anexo 5. Já o protocolo para os ensaios da fase 2 consiste no próprio procedimento descrito no item C.5.4, do anexo C, da norma NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

Para definir o tamanho da amostra utilizou-se a referência da NBR 7190-97 (ABNT, 1197) no anexo C, item C 2 – amostragem, que solicita a quantidade mínima de seis corpos de prova para madeiras conhecidas e 12 para desconhecidas. Na fase 1 de ensaios optou-se, inicialmente, por 12 amostras. Já para a fase de ensaios 2 o número de amostras iniciais seria de 13 unidades para cada situação a ser ensaiada, ou seja:

- 13 Corpos de prova para ensaio paralelo às fibras com cavilha de madeira;
- 13 Corpos de prova para ensaio paralelo às fibras com cavilha de compósito;
- 13 Corpos de prova para ensaio normal às fibras com cavilha de madeira,
- 13 Corpos de prova para ensaio normal às fibras com cavilha de compósito.

Porém na hora de montar os respectivos corpos de prova, descritos no item 4.2.6 – Montagem dos corpos de prova, alguns vieram a apresentar rachaduras, inviabilizando o seu uso. Assim, reduziu-se à quantidade mínima de 6 amostras para todas as configurações, havendo corpos de prova suficientes e na condição padrão determinada pela norma.

Dos resultados obtidos nos ensaios foram calculadas médias, desvios padrão e coeficientes de variação (cv). Para as comparações dos quesitos entre os materiais dos grupos de corpo de prova no sentido normal às fibras e corpos de prova no sentido paralelo às fibras, para cavilhas elaboradas em madeira e em compósito; foi feito o teste t para dados não pareados. O nível de significância usado foi 0,05 e as análises foram feitas no software R Core Team (2019).

4.3.3 Máquinas de Testes

Os ensaios da fase 1 e a análise comparativa da resistência das cavilhas de compósito, variando o percentual de resina flexível em sua composição, descrito no item 4.2.5 – Confecção das cavilhas de compósito, foram realizados no laboratório da unidade do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) em Arapongas/PR, em cinco momentos distintos:

- 06/julho/2018 – Ensaio da fase 1 com as cavilhas de madeira;
- 08/agosto/2018 – Ensaio da fase 1 com as cavilhas de compósito;
- 09/novembro/2018 – Ensaio para avaliar a resistência das cavilhas de compósito variando o percentual de resina flexível;
- 07/dezembro/2018 – Ensaio para avaliar a resistência das cavilhas de compósito com 60% de resina flexível,

- 14/fevereiro/2019 – Novo ensaio da fase 1 com as cavilhas de compósito, sem resina flexível, porém, utilizando o protocolo de elaboração das cavilhas.

Utilizou-se, nessa fase de ensaios, a máquina universal de ensaios EMIC - Modelo DL 10000 - número 7414 - NS 144 (figura 68) com certificado de calibração número 17072401RB de 31/07/2017 pela INSTRON; e, célula de carga da marca EMIC - CCE 100 kN - número 7382.

Figura 68 - Máquina Universal de ensaios DL 10000 e célula de carga 100 kN – Laboratório SENAI em Arapongas / PR



Fonte: Autor.

Os ensaios da fase 2 foram realizados nos dias 8 e 11/fevereiro/2019, utilizando-se a máquina universal de ensaios EMIC - Modelo DL 30000 - número 10952 - NS 123 (figura 58) com certificado de calibração número 0169/18 de 02/junho/2018 pela INSTRUQUAL; e, célula de carga da marca EMIC - CCE 300 kN - número 10623.

Esta última, localizada no laboratório de estruturas do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) em Maringá/PR (figura 69). A mudança de laboratório e de equipamento para esse nível de ensaios deveu-se inicialmente a três condições, que foram:

- A dimensão da peça 'A' – utilizada no corpo de prova para avaliação no sentido normal às fibras – ser muito próxima à largura da área de trabalho da máquina do laboratório da unidade de Arapongas;
- O equipamento localizado no laboratório do SENAI em Arapongas/PR não possuir a programação específica para a realização do procedimento de ensaio solicitado,

- A capacitação técnica dos colaboradores do laboratório do SENAI em Maringá/PR, mais próxima para a realização do ensaio específico.

Figura 69 - Máquina Universal de ensaios DL 30000 e célula de carga 300 kN – Laboratório SENAI em Maringá / PR



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um conjunto significativo de informações serão apresentados nos tópicos seguintes, sendo essas discutidas e referenciadas ao marco teórico.

Sendo um assunto com características inovadoras e por se tratar de uma contribuição para a construção de um conhecimento – além de considerar o exercício da elaboração da pesquisa para o autor – cabem algumas considerações que irão contribuir para a melhor compreensão dos resultados obtidos neste trabalho.

Inicialmente, a proposta da pesquisa era de confeccionar as cavilhas de compósito *in situ*, ou seja, diretamente na ligação. Fazia-se necessário, então uma certa viscosidade da mistura; bem como o uso das fibras picadas ao invés das contínuas, permitindo o desejável processo de injeção do compósito nos orifícios definidos.

Ao longo da pesquisa – por conta do volume de trabalho demandado, da complexidade dos elementos que se interligavam e dos mecanismos necessários para se fazer a injeção do compósito, dentre outros fatores - limitou-se à elaboração das cavilhas na configuração de pré-moldadas, mas mantendo-se o uso da fibra de vidro picada.

Assim, o item 5.1 analisa os resultados dos ensaios da fase 1, o item 5.2 os resultados dos ensaios da fase 2 e o item 5.3 sobre o modo de ruptura.

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA FASE 1

5.1.1 Resultado Inicial com Cavilha de Madeira e Cavilha de Compósito

Na etapa inicial de experimentos (fase 1), utilizou-se a madeira de Jatobá para as cavilhas de madeira; e, para as cavilhas de compósito, o sistema de resina SQ 2001/SQ 3154. Suas propriedades mecânicas são comparadas na seqüência (tabela 6).

Tabela 6 - Resultado médio de corpos de prova com cavilhas de madeira e de compósito - Fase 1.

Variáveis	Cavilha de madeira	Cavilha de compósito	p-valor
RESISTÊNCIA DA CAVILHA (kN) (Para uma secção de corte) - Média (D.P.) - CV%	3.19 (0.49) - 15.48%	2.16 (0.63) - 29.09%	< 0.01
RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm) - Média (D.P.) - CV%	35.15 (6.21) - 17.67%	28.89 (8.81) - 30.49%	0,04
FORÇA MÁXIMA (kN) - Média (D.P.) - CV%	65.18 (9.19) - 14.10%	47.21 (11.32) - 23.97%	< 0.01

*p-valor do teste t para dados não pareados

Fonte: URBANO, M.R..

O resultado médio de resistência das cavilhas de madeira foi de 3,19 kN para 2,16 kN nas cavilhas de compósito, representando redução aproximada de 32%, na resistência das cavilhas de compósito.

Considerando que nestes resultados o coeficiente de variação para as cavilhas de madeira foi de 15,48 %, proporcionando confiabilidade nos valores. O mesmo não acontece para as cavilhas de compósito, com coeficiente de variação de 29,09 %, o dobro da cavilha em comparação com o outro material.

Esta variação, no estágio em que se encontrava a pesquisa, acreditava-se que dois elementos estavam determinando o respectivo resultado. Primeiro a ausência de algumas condições padrões no protocolo de elaboração das cavilhas, tornando possível sua reprodução em escala, resultando na uniformidade de suas características.

Segundo, que as cavilhas de compósito, devido à característica da resina epóxi, de ruptura frágil e apresentarem fissuras precocemente, segundo Brantseva *et al.* (2016), contribuiu para o respectivo resultado.

Como as cavilhas, de madeira ou de compósito, após os ensaios, permaneciam inseridas dentro do orifício da peça complementar do corpo de prova, não houve a percepção de identificar a característica visual da ruptura, o que poderia ter contribuído para adequações nas etapas posteriores.

Neste contexto, vinculado à resistência da cavilha, cabe comparativamente ilustrar, o trabalho de Recco (2014) - considerando as devidas proporções dos elementos de ligação utilizados nas pesquisas. A qual elabora uma análise experimental do sistema de cobertura caibro treliçado em MLP (madeira laminada pregada) utilizando madeira serrada de *Pinus SPP*; aonde utiliza pinos metálicos (tipo pregos): PA – prego liso, PB – prego liso com a ponta dobrada, PC – prego tipo ardox.

As ligações desta eram constituídas por 9 pinos, cada uma com os modelos de pregos descritos 18 x 36. Seus resultados médio de resistência por pino metálico (tabela 7) foram inferiores aos das cavilhas de madeira e de compósito. Bem como, seus coeficientes de variação, significativamente superiores.

Tabela 7 – Resultado médio comparativo da resistência da cavilha (fase 2 de ensaios) com os pinos metálicos – Elaborado por RECCO (2014).

REFERÊNCIAS	RESISTÊNCIA DA CAVILHA E DO PINO METÁLICO (kN)	
CAVILHA DE COMPÓSITO	RESISTÊNCIA (KN)	2,16
	Coeficiente Variação (%)	8,50
PINO METÁLICO (PA) SEGUNDO RECCO (2014 , P. 59)	RESISTÊNCIA (kN)	1,32
	Coeficiente Variação (%)	38,00
PINO METÁLICO (PB) SEGUNDO RECCO (2014 , P. 59)	RESISTÊNCIA (kN)	1,73
	Coeficiente Variação (%)	36,00
PINO METÁLICO (PC) SEGUNDO RECCO (2014 , P. 59)	RESISTÊNCIA (kN)	1,88
	Coeficiente Variação (%)	23,00

Fonte: Autor.

Já a rigidez média das cavilhas de madeira foi de 35,15 kN/cm em comparação ao valor médio de 28,89 kN/cm para as cavilhas de compósito. Diferença de 18% menor para as cavilhas com compósito; porém, apresentando coeficiente de variação de 17,67% para os resultados das cavilhas de madeira e 29,2% para as cavilhas de compósito. O qual não proporciona confiabilidade no

resultado obtido com as cavilhas de compósito e determina a necessidade de aprofundar a análise deste resultado pontual.

Assim sendo, as cavilhas de compósito não proporcionando a mesma confiabilidade nos resultados, em comparação às cavilhas de madeira, optou-se por melhorar suas propriedades através da inserção de percentual de resina flexível ao compósito, conforme sugere Brantseva *et al.* (2016).

5.1.2 Resultados das Cavilhas de Compósito com Resina Flexível

Na tabela 8, são apresentados os resultados médios de resistência da cavilha e rigidez da ligação, obtidos nos ensaios das cavilhas de compósito com acréscimo aleatório de: 10%, 30%, 50% e 70%, de resina flexível ao compósito, utilizando-se do mesmo protocolo para o fase 1 de ensaios, cujos resultados foram reunidos para melhor visualização e análise.

Tabela 8 - Resultado médio de corpos de prova – Fase 1 – Teste com percentual variado de resina flexível

REFERÊNCIAS	RESISTÊNCIA DA CAVILHA (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (kN)
LIGAÇÃO COM CAVILHA DE COMPÓSITO (Com 10% resina flexível)	MÉDIA	2,12	44,36
	DESV. PADRÃO	0,66	14,22
	COEF. VARIAÇÃO (%)	31,20	32,05
LIGAÇÃO COM CAVILHA DE COMPÓSITO (Com 30% resina flexível)	MÉDIA	2,42	49,01
	DESV. PADRÃO	0,30	5,44
	COEF. VARIAÇÃO (%)	12,20	11,11
LIGAÇÃO COM CAVILHA DE COMPÓSITO (Com 50% resina flexível)	MÉDIA	2,92	60,03
	DESV. PADRÃO	0,09	2,29
	COEF. VARIAÇÃO (%)	3,20	3,81
LIGAÇÃO COM CAVILHA DE COMPÓSITO (Com 60% resina flexível)	MÉDIA	2,10	48,40
	DESV. PADRÃO	0,52	11,29
	COEF. VARIAÇÃO (%)	24,80	23,33
LIGAÇÃO COM CAVILHA DE COMPÓSITO (Com 70% resina flexível)	MÉDIA	2,62	54,07
	DESV. PADRÃO	0,31	5,73
	COEF. VARIAÇÃO (%)	11,70	10,60

Fonte: Autor

Nesta é possível verificar que os resultados médios de resistência das cavilhas aumentam, em relação à cavilha sem resina flexível, a partir da inserção teste de 30%, com percentual do coeficiente de variação relativamente reduzido, proporcionando confiabilidade no resultado.

Assim concluída a etapa de ensaios da fase 1, com a identificação prática e confirmando a literatura, que a inserção da resina flexível ao compósito proposto contribuiria para apresentação de melhores resultados no desempenho das cavilhas de compósito e aproximando estas das características das cavilhas de madeira.

Para o nível seguinte de ensaios, haveria necessidade de estabelecer qual o percentual de resina flexível a ser utilizado na elaboração das cavilhas de compósito. Percentuais compreendidos entre 30% e 50% demonstraram-se como os mais adequados; porém, pela interpretação equivocada dos dados descritos na tabela 3, no estágio inicial da pesquisa, definiu-se o percentual padrão de 60%, de resina flexível a ser utilizado nas cavilhas de compósito da fase 2.

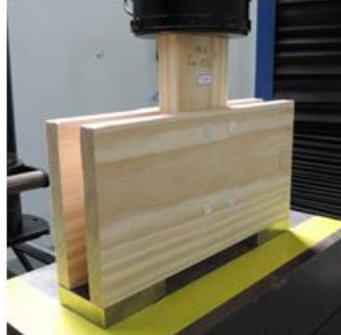
Mesmo assim, considerando o tamanho da amostra teste, de 3 corpos de prova e os percentuais dos coeficientes de variação, oscilando para cada percentual, ainda demonstravam que existia alguma variável que não estava sendo percebida, pelo nível ou característica do ensaio.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA FASE 2

Através dos ensaios na fase 2, conforme descrito no item 4.2.6 foi possível elaborar os diagramas força – deformação conforme orientação da NBR 7190:97. Foram então determinados os valores de resistência da ligação, resistência da cavilha e de rigidez da ligação, exemplificados no gráfico 2 e gráfico 3, cujos resultados estão apresentados nas tabelas: 9, 10, 11 e 12 e nas figuras 70, 71, 72 e 73.

5.2.1 Corpo de Prova Sentido Normal às Fibras com Cavilhas de Compósito

Figura 70 - Corpo de prova com cavilha de compósito – normal às fibras



Fonte: Autor.

Tabela 9 - Ensaio da Fase 2 – corpo de prova com cavilha de compósito – normal às fibras (CN).

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO (kN)	RESISTÊNCIA DA CAVILHA (kN) (Para uma secção de corte)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (kN)
CP 1	6,25	0,76	73,7	8,4
CP 2	8,75	1,09	58,3	11,3
CP 3	10,2	1,28	49,9	11,5
CP 4	8,5	1,06	53,6	11,1
CP 5	6,75	0,84	67,7	8,9
CP 6	9,75	1,22	57,0	13,0

Fonte: Autor.

5.2.2 Sentido Normal às Fibras com Cavilhas de Madeira

Figura 71 - Corpo de prova com cavilha de madeira – normal às fibras



Fonte: Autor.

Tabela 10 - Ensaio da fase 2 – corpo de prova com cavilha de madeira – normal às fibras (MN)

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO (kN)	RESISTÊNCIA DA CAVILHA (kN) (Para uma secção de corte)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (kN)
CP 1	15,20	1,91	91,10	17,17
CP 2	10,70	1,34	73,60	13,08
CP 3	10,50	1,31	67,60	17,46
CP 4	12,70	1,59	91,80	16,26
CP 5	15,20	1,91	79,70	17,29
CP 6	14,00	1,75	94,70	17,39

Fonte: Autor.

5.2.3 Ensaio no Sentido Paralelo às Fibras com Cavilhas de Compósito

Figura 72 - Corpo de prova com cavilha de compósito – paralelo às fibras



Fonte: Autor.

Tabela 11 - Ensaio da fase 2 – corpo de prova com cavilhas de compósito – paralelo às fibras (CP)

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO (kN)	RESISTÊNCIA DA CAVILHA (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (kN)
CP 1	10,50	1,28	89,40	12,89
CP 2	9,75	1,24	84,20	12,68
CP 3	12,00	1,50	96,70	15,75
CP 4	11,70	1,47	107,30	13,14
CP 5	11,20	1,41	112,70	13,18
CP 6	12,20	1,53	96,70	14,93

Fonte: Autor

5.2.4 Ensaio no Sentido Paralelo às Fibras com Cavilhas de Madeira.

Figura 73 - Corpo de prova com cavilha de madeira – paralelo às fibras



Fonte: Autor.

Tabela 12 - Ensaio da fase 2 – corpo de prova com cavilhas de madeira – paralelo às fibras (MP)

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO (kN)	RESISTÊNCIA DA CAVILHA (kN) (Para uma secção de corte)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (kN)
CP 1	17,70	2,22	122,70	26,19
CP 2	17,80	2,23	127,90	26,82
CP 3	18,50	2,31	119,20	24,67
CP 4	19,70	2,47	110,00	25,18
CP 5	16,80	2,10	97,60	23,99
CP 6	18,40	2,30	114,00	21,86

Fonte: Autor.

5.2.5 Comparativo: Cavilha de Madeira x Cavilha de Compósito

Na tabela 13 são apresentados os valores médios para a resistência da ligação, a resistência da cavilha e a rigidez da ligação, para o corpo de prova no sentido normal às fibras com cavilhas de madeira e cavilhas de compósito. E, na tabela 14, os mesmos indicadores, porém, para os corpos de prova no sentido paralelo às fibras, para os mesmo materiais das cavilhas.

Tabela 13 - Resultado médio com corpo de prova no sentido normal às fibras (Fase 2)

Variáveis	Cavilha de madeira	Cavilha de compósito	p-valor
RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO (kN) - Média (D.P.) - CV%	13.05 (2.11) - 16.18%	8.37 (1.58) - 18.92%	< 0.01
RESISTÊNCIA DA CAVILHA (kN) (Para uma secção de corte) - Média (D.P.) - CV%	1.63 (0.27) - 16.28%	1.04 (0.20) - 19.67%	< 0.01
RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm) - Média (D.P.) - CV%	83.08 (11.10) - 13.36%	60.03 (8.96) - 14.93%	< 0.01
FORÇA MÁXIMA (kN) - Média (D.P.) - CV%	16.44 (1.70) - 10.36%	10.68 (1.73) - 16.17%	< 0.01

*p-valor do teste t para dados não pareados

Fonte: Autor

Na tabela 13, aonde são expressos os resultados médios para as ligações com cavilhas de madeira e cavilhas de compósito no sentido normal às fibras, observa-se que a resistência média das cavilhas de madeira ficou em 1,63 kN, com coeficiente de variação de 16,28 %; superior à de compósito, com 1,04 kN e coeficiente de variação de 19,67 %.

Assim como o resultado médio da rigidez da ligação com cavilha de madeira se apresentou com 83,08 kN/cm, com coeficiente de variação em 13,36 %. Já para a ligação com cavilha de compósito a rigidez da ligação ficou em 60,03 kN/cm, com coeficiente de variação em 14,93%.

Ambas as situações reforçam positivamente o desempenho das ligações no sentido normal às fibras para aquelas elaboradas com cavilhas de madeira; apresentando pouca variabilidade, traduzida pelos coeficientes de variação, muito próximos, da cavilha de madeira e da cavilha de compósito.

Tabela 14 - Resultado médio com corpo de prova no sentido paralelo às fibras (Fase 2)

Variáveis	Cavilha de madeira	Cavilha de compósito	p-valor
RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO (kN) - Média (D.P.) - CV%	18.15 (0.97) - 5.36%	11.23 (0.95) - 8.43%	< 0.01
RESISTÊNCIA DA CAVILHA (kN) (Para uma secção de corte) - Média (D.P.) - CV%	2.27 (0.12) - 5.38%	1.40 (0.12) - 8.53%	< 0.01
RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm) - Média (D.P.) - CV%	115.53 (10.69) - 9.28%	97.83 (10.68) - 10.92%	0,02
FORÇA MÁXIMA (kN)- Média (D.P.) - CV%	24.79 (1.76) - 7.10%	13.76 (1.26) - 9.18%	< 0.01

*p-valor do teste t para dados não pareados

Fonte: Autor

Na tabela 14, aonde são expressos os resultados médios para as ligações com cavilhas de madeira e de compósito no sentido paralelo às fibras, observa-se que a resistência média das cavilhas de madeira ficou em 2,27 kN, (COV 5,38 %); superior à de compósito, com 1,40 kN (COV 8,53 %).

O resultado médio da rigidez da ligação com cavilha de madeira observado foi de 115,53 kN/cm (COV 9,28 %). Já para a ligação com cavilha de compósito a rigidez da ligação foi de 97,83 kN/cm, (COV 10,92%).

Ambas as situações mostram o melhor desempenho das ligações com cavilhas de madeira no sentido paralelo às fibras. A variabilidade dos dois tipos de ligação mostrou bastante semelhante com coeficiente de variação entre 9,28 % e 10,92 % para a cavilha de madeira e de compósito respectivamente.

Tabela 15 - Resultado comparativo da resistência da cavilha da fase 1 e fase 2 de ensaios – sentido paralelo às fibras

CORPO DE PROVA	FASE 1		FASE 2	
	Cavilha de madeira	Cavilha de Compósito	Cavilha de madeira	Cavilha de Compósito
	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)
CP 1	3,30	2,55	2,22	1,28
CP 2	2,95	1,70	2,23	1,24
CP 3	3,55	1,30	2,31	1,50
CP 4	3,05	1,35	2,47	1,47
CP 5	3,60	1,65	2,10	1,41
CP 6	3,25	2,85	2,30	1,53
CP 7	2,60	1,60		
CP 8	4,00	2,20		
CP 9	2,25	3,05		
CP 10	3,10	2,40		
CP 11	2,90	2,80		
CP 12	3,75	2,60		
CP 13		2,75		
CP 14		2,40		
CP 15		2,35		
CP 16		1,05		
MÉDIA	3,19	2,16	2,27	1,40
DESV. P.	0,49	0,63	0,12	0,12
COEF. VAR. (%)	15,48	29,09	5,38	8,53

Fonte: Autor.

E ainda, na tabela 15 é possível verificar que há uma redução nos valores médios de resistência obtidos nos ensaios da fase 1 para os ensaios do fase 2. Porém, mesmo sendo mais baixos na fase 2, o coeficiente de variação destes é menor, demonstrando certa estabilidade ou homogeneidade entre os resultados de resistência das cavilhas.

Contribui para este resultado com menor variabilidade, nos ensaios da fase 2, readequação do protocolo de elaboração das cavilhas de compósito da fase 1 para a fase 2.

Oportuno destacar que as cavilhas de madeira da fase 1 foram elaboradas com madeira de Jatobá e as da fase 2 com madeira de Corymbia Citriodora,

justificando parcialmente a redução dos valores de resistência encontrados experimentalmente.

A título de comparação, estes resultados são confrontados com os obtidos por Almeida (2019), trabalhou com ligações para painéis CLT com cavilhas de compósito de diâmetro de 6 mm, filamentos contínuos de fibra de vidro. Na tabela 16 é possível verificar os resultados obtidos em cada trabalho.

Tabela 16 – Resultado médio comparativo da rigidez da ligação com cavilha de compósito (fase 2 de ensaios) com as cavilhas de compósito elaboradas por Almeida (2019)

REFERÊNCIAS	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO COM CAVILHA	
CAVILHA DE COMPÓSITO COM 60% RESINA FLEXIVEL (Paralela à fibra)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	97,80
	Coef. Variação (%)	10,90
CAVILHA DE COMPÓSITO COM 60% RESINA FLEXIVEL (Normal à fibra)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	60,00
	Coef. Variação (%)	14,90
CAVILHA DE COMPÓSITO SEGUNDO ALMEIDA (2019, P. 94) (Ligação de extremidade)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	33,90
	Coef. Variação (%)	47,83
CAVILHA DE COMPÓSITO SEGUNDO ALMEIDA (2019, P. 95) (Ligação Half-lap)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	22,90
	Coef. Variação (%)	27,00

Fonte: Autor.

Observa-se na tabela 16 que ALMEIDA (2019) obteve como valor de rigidez da ligação de extremidade 33,9 kN/cm e o valor de rigidez de 22,9 kN/cm para ligação do tipo half - lap .

Nesta pesquisa, se observaram valores de 97,8 kN/cm na ligação em sentido paralelo às fibras de 60,0 kN/cm para a ligação em sentido normal às fibras. Valores significativamente superiores e com percentual do coeficiente de variação inferior aos descritos por Almeida (2019). Vale notar que naquele trabalho, as cavilhas tem 6 mm de diâmetro em comparação às deste estudo com 12,7 mm.

5.2.6 Tratamento estatístico: Cavilha de Madeira x Cavilha de Compósito

Porém, fazendo um tratamento estatístico mais aprimorado, através da Análise de Variância (ANOVA), é possível constatar, na tabela 17, que os resultados estatisticamente obtidos, comprovam que a resistência para a cavilha de madeira e a resistência da cavilha de compósito, tarjados em verde, possuem semelhança.

Já a rigidez das cavilhas, também para cavilhas elaboradas em madeira e cavilhas de compósito, tarjados em amarelo, possui semelhança.

E ainda destacando que a resistência da ligação também possui semelhança para as elaboradas com cavilhas de madeira e com cavilhas de compósito, tarjadas em azul na planilha.

Tabela 17 – Dados obtidos em ensaio analisados estatisticamente.

Variáveis	Cavilha madeira normal as fibras	Cavilha compósito normal as fibras	Cavilha Madeira paralelo as fibras	Cavilha Compósito paralelo as fibras	p-valor
RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO (KN) - Média (D.P.) - CV%	13.05 (2.11) - 16.18%	8.37 (1.58) - 18.92%	18.15 (0.97) - 5.36%	11.23 (0.95) - 8.43%	< 0.01
RESISTÊNCIA DA CAVILHA (KN) (Para uma secção de corte)	1.63 (0.27) - 16.28%	1.04 (0.20) - 19.67%	2.27 (0.12) - 5.38%	1.40 (0.12) - 8.53%	< 0.01
RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (KN/cm)	83.08 (11.10) - 13.36%	60.03 (8.96) - 14.93%	115.53 (10.69) - 9.28%	97.83 (10.68) - 10.92%	< 0.01
FORÇA MÁXIMA (KN)	16.44 (1.70) - 10.36%	10.68 (1.73) - 16.17%	24.79 (1.76) - 7.10%	13.76 (1.26) - 9.18%	< 0.01

*p-valor do teste t para dados não pareados

Fonte: Autor

5.3 Modo de Ruptura

A análise da ruptura da fase 2 nos corpos de prova paralelo às fibras, confeccionados com cavilhas de madeira são mostrados na (figura 74) e aqueles com cavilha de compósito na (figura 75).

Os corpos de prova elaborados com as cavilhas de madeira, mesmo comprometidos com a ação dos ensaios, ainda permanecem, a maior parte, com a configuração inicial, com as peças unidas; já nos corpos de prova de compósito, se observa o oposto.

Figura 74 - Corpo de prova paralelo às fibras com cavilhas de madeira



Fonte: Autor.

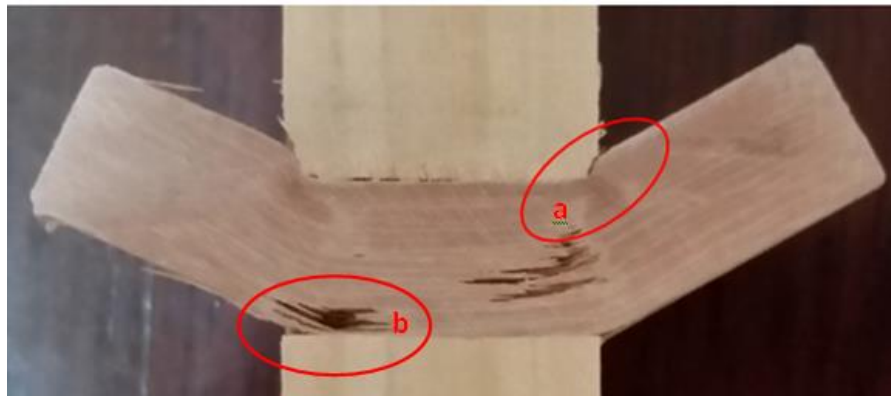
Figura 75 - Corpo de prova paralelo às fibras com cavilhas de compósito



Fonte: Autor.

Em corte identifica-se que na cavilha de madeira (figura 76), quando submetidas à aplicação de carga, ocorre uma compressão das camadas internas (a) e tração na região opostas (b).

Figura 76 - Demonstração em corte longitudinal da cavilha de madeira e seus locais de ruptura, quando sujeita à aplicação de uma determinada carga



Fonte: Autor

Quanto às cavilhas de compósito (figura 77) observa-se que ocorre a ruptura em toda a secção de corte.

Figura 77 - Demonstração em vista longitudinal da cavilha de compósito e seus locais de ruptura, quando sujeita à aplicação de uma determinada carga.



Fonte: Autor

Observando a característica da ruptura, encontramos duas imagens completamente opostas. A cavilha de madeira (figura 78) com as fibras visivelmente no sentido longitudinal ao eixo da própria cavilha. A cavilha de compósito (figura 79) com as fibras no sentido perpendicular ao eixo da cavilha.

Figura 78 - Secção de rompimento da cavilha de madeira



Fonte: Autor

Figura 79 - Representação da secção transversal da ruptura da cavilha de compósito

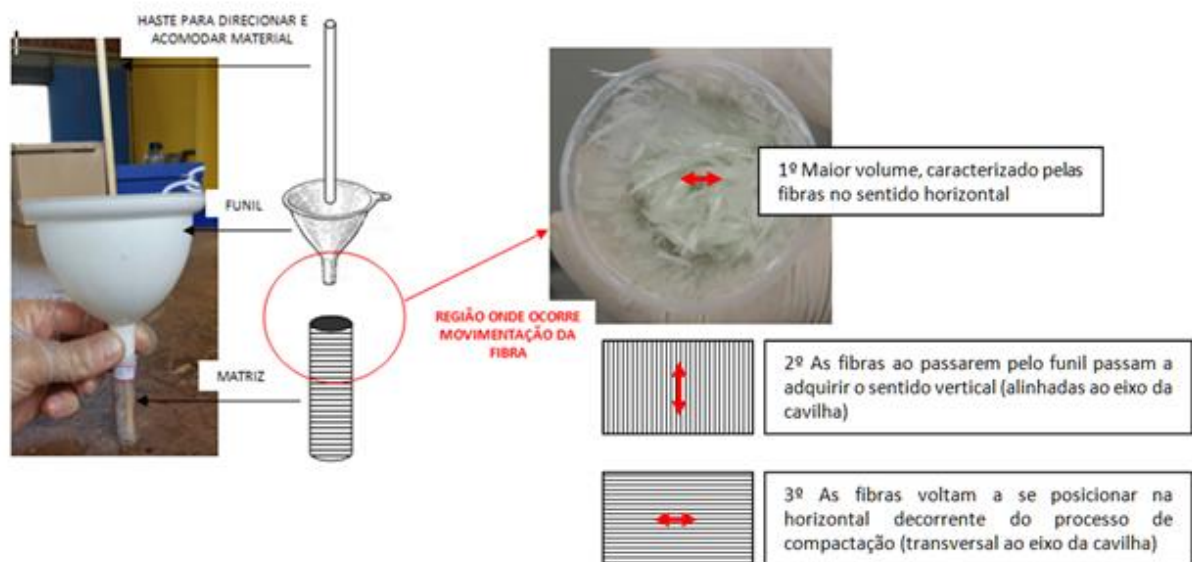


Fonte: Autor.

Na fabricação o compósito é condicionado em um funil e seu conteúdo é conduzido, com auxílio de uma haste, para a matriz. Nesse processo há a necessidade de fazer a acomodação do material em intervalos, a fim de que todo o conteúdo calculado venha a ser condicionado na matriz, garantindo o padrão de massa de cada uma delas.

Nos protocolos de elaboração, anexos 6 e 7, orienta-se que a aproximadamente 25% do material inserido na matriz, seja levemente compactado, conforme representação na figura 80.

Figura 80 - Esquema de como transferir o compósito do funil para o corpo de prova



Fonte: Autor.

Contudo, ainda que a fibra entre na matriz no sentido do eixo desta, as fibras mudam de sentido ao sofrerem sucessivas compactações, e acabam por posicionar-se perpendicularmente ao eixo.

Assim explica-se o menor desempenho das ligações cavilhadas de compósito em relação às de madeira. Nas primeiras as fibras ficam posicionadas, em consequência da compactação, quase que paralelas ao plano de corte. Nas de madeira, as fibras são perpendiculares ao esforço de corte com continuidade em todo o comprimento de cavilha.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho trata da utilização do compósito de resina epóxi reforçado por fibras na elaboração de conectores do tipo cavilha para ligações em estruturas de madeira. Em se tratando de um tema atual e de caráter inovador, foram necessários abordar vários tópicos, afim de se ter o máximo possível de informações, para a melhor compreensão do tema e respectiva operacionalização da pesquisa como um todo.

É amplo o universo de possibilidades de elaboração dos compósitos, e neste caso se conclui que é possível obter um material alternativo para uso em ligações de madeira, com variabilidade de resultados reduzida, podendo ser reproduzido em escala industrial, com padrões pré - estabelecidos.

Constitui-se também em uma alternativa à utilização de espécies nobres de madeira que escasseiam comercialmente.

Mesmo existindo alguns fatores que podem sofrer adequações, como: o fato das fibras acomodarem-se, por conseqüência do método empregado, no sentido transversal ao eixo da cavilha e não longitudinal, semelhante que ocorre na cavilha de madeira. Definido no processo de compactação, justificando a necessidade de desenvolver um mecanismo capaz de injetar o compósito na matriz, mantendo as fibras alinhadas e aplicando determinada pressão, capaz de compactar o conteúdo no espaço projetado.

O processo também deve garantir a interação entre fibra e matriz, afim de que toda a superfície da fibra esteja umedecida com a resina, contribuindo para melhorar o desempenho do compósito.

E por fim, deve-se proceder à análise macroscópica do compósito e monitorar o processo de cura, identificando:

- Se as fibras estão impregnadas em toda a sua superfície com a resina epóxi,
- Se as fibras estão orientadas no sentido paralelo ao eixo da cavilha,
- Identificar se há espaços vazios, decorrente da compactação errônea do material,
- Se a cura chegou ao estagio da vitrificação.

É possível concluir que, as cavilhas elaboradas em compósito, apresentam semelhança no seu desempenho às cavilhas de madeira, em estruturas de madeira.

Algo extremamente positivo, a considerar o universo de possibilidade a serem desbravadas a partir deste novo material.

Seja como alternativa construtiva, nas ligações de estruturas de madeira, aonde os conectores metálicos sofrem degradação, como nos depósitos para armazenagem de produtos químicos ou de estruturas sujeitas a maresia.

Assim como, decorrente da dificuldade de obtenção das madeiras tidas como nobres, poder continuar elaborando as ligações do tipo cavilha, com todas as propriedades que lhe são particulares.

Trabalhos Futuros

- Formulação de outros compósitos poliméricos com o menor tempo de cura e do custo dos componentes.
- Fazer uso do compósito polimérico na elaboração de outros elementos de ligação em estruturas de madeira.
- Estudar o desempenho das cavilhas de compósito com variações dimensionais (relação diâmetro / comprimento).
- Estudar a eficiência das cavilhas de compósito aplicadas em pequenas estruturas de madeira, como mobiliários.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11700:91**: Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento para uso geral – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 2299:10**: Madeira serrada de folhosas – defeitos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:97**: Projeto de estrutura de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Revista Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 158-166, jan./dez. 2000.
- ALMEIDA, A. C. **Aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro - GFRP em ligações cavilhadas para CLT**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- AMARAL, T. P.; BARRA, G. M. O.; BARCIA, F. L.; SOARES, B. G. Estudo das propriedades de compósitos de polianilina e resina epoxídica. **Polímeros**, São Carlos, v. 11, n. 3, p. 149-157, 2001.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 5764-97a (2018)**: evaluating dowel – bearing strength of Wood and Wood based products. United States: ASTM, 2018.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 790-17**: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. Conshohocken, USA: ASTM, 2017.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 8023-17**: standard specification for round wood dowels (pegs) for use in Wood construction. United States, 2017.
- BALSEIRO, A. M. R. **Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Porto, 2007.
- BARCIA, F. L.; SAMPAIO, E. M.; SOARES, B. G. Desenvolvimento de adesivo epoxídico para ligas de aviação. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 7., 2003, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2003. p. 57-58.
- BEER, F. P.; JOHNSTON JUNIOR, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos materiais**. Tradução de José Benaque Rubert. Porto Alegre: AMGH, 2015.

BORSCHIVER, S.; OLIVEIRA, M. M. **Relatório final roadmap tecnológico plásticos de engenharia reforçado com fibras longas**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

BORST, K.; JENKEL, C.; MONTERO, C.; COLMARS, J.; GRILL, J.; KALISKE, M.; EBERHARDSTEINER, J. Mechanical characterization of wood: An integrative approach ranging from nanoscale to structure. **Computers and Structures**. Reino Unido, n. 127, p. 53-67, 2013.

BRANTSEVA, T. V.; SOLODILOV, V. I.; ANTONOV, S. V.; GORBUNOVA, I. Y.; KOROHIN, R. A.; SHAPAGIN, A. V.; SMIRNOVA, N. N. Epoxy modification with poly (vinyl acetate) and poly (vinyl butyral). I. structure, thermal, and mechanical characteristics. **Journal of Applied Polymer Science**, USA, v. 44081, p. 1-14, 2016.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. Aplicações de materiais compósitos de resina e fibras na engenharia de construção. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 26, p. 45-60, 2009.

CAVILHA. **Quem somos**. Disponível em: <http://www.cavilha.com.br/>. Acesso em: 1 mar. 2019.

CAVILHAS de madeira no sótão do tabernáculo de Salt Lake. Disponível em: <https://maisfe.org/vida-mormon/tabernaculos-mormons-edificios-religiosos-e-comunitarios/attachment/135-sl-tabernacle-attic-wood-pegs/>. Acesso em: 1 mar. 2019.

COSTA, M. L.; REZENDE, M. C.; PARDINI, L. C. Métodos de estudos da cinética de cura de resinas epóxi. **Polímeros**, São Carlos, v. 9, n. 2, p. 37-44, abr./jun. 1999.

CRANKER, K. R.; BRESLAU, A. J. Epoxy casting resins modified with polysulfide liquid polymer. **Industrial and Engineering Chemistry**, USA, v. 48, n. 1, p. 98-103, Jan. 1956.

FONSECA, C. B.; COSTA, G. F.; DIAS, F. M. Reforço com fibra de vidro em painéis compensados – uma alternativa ecológica. *In*: SEGÊT - SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 8., 2011, Resende - RJ. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2011. p. 1-15.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

ISHIKURA, J.T.; MOLINA, J.C.; BÔAS, D.V. Sistema de construção japonês em madeira. **Engvista**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 4, p. 819-838, out. 2017.

- JUNIOR, Jairo R. A et. Al. Avaliação das estruturas de cobertura em madeira de um galpão de estoque de produtos químicos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 75-85, jul./set. 2014.
- KIM, B.; CHOI, J.; YANG, S.; YU, S.; CHO, M. Influence of crosslink density on the interfacial characteristics of epoxy, nanocomposites. **International Journal for the Science and Technology of Polymers**, Akron, v. 60, p. 186-197, 2015.
- LOOS, A. C.; SPRINGER, G. S. **Curing of graphite / epoxy composites**. University of Michigan: Department of mechanical engineering and applied mechanics, 1983.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- MITTAL, V.; SAINI, S.; SINHA, S. Natural fiber-mediated epoxy composites: a review. **Composites Part B**, New Orleans, n. 99, p. 425-435, 2016.
- MOURA, J. D.; PLETZ, E.; RECCO, E. G.; LEAL, L. C.; STRASS, M. C. **Qualidade e processo produtivo da madeira para utilização em mobiliário**. Londrina, UEL, 2012.
- NASCIMENTO, A. E. G. **Avaliação da molhabilidade de soluções de tensoativos em aço inoxidável**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.
- NOW you can build ANY shed. **Pinterest**. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/774126623426904406/>. Acesso em: 1 mar.2019.
- OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- OWENS CORNING COMPOSITE MATERIALS LLC. **Composite solutions reinforcement guide**. Ohio: Owens Corning, 2011. Disponível em: http://www.ocvreinforcements.com/pdf/library/Composite_Solutions_Guide_100360_E_finalprintable.pdf. Acesso em: 5 mar. 2019.
- OWENS CORNING COMPOSITE MATERIALS LLC. **Fibra picada para reforço em resinas fenólicas, epóxi, baquelite e poliéster insaturado**. Ohio, 2012. Disponível em: <http://www.owenscorning.com.br/upload/produto/pdf/6678e4aa-2960-441b-93a9-89f4a0802b9b.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2019.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- PHILPOT, T. A. **mecânica dos materiais: um sistema integrado de ensino**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- PINEDA, A. F. E. **Propriedades mecânicas, adesivas e adsorção de água de polímeros epoxídicos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.
- POPOV, E. P. **Introdução à mecânica dos sólidos**. São Paulo: Ed. Blucher, 1978.

RAPONI, O. A. **Desenvolvimento de um módulo dielétrico para monitoramento da cura de resinas termorrígidas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

RECCO, E. G. Análise experimental do sistema de cobertura caibro treliçado em MLP (Madeira laminada pregada) utilizando madeira serrada de Pinus SPP. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: ciência e tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. E4-E10, 2000.

SAKAMOTO, C. **Não jogue epóxi fora! 07 erros com resinas epóxi, e como resolvê-los**. 2018. Disponível em: <https://www.epoxi.com.br>. Acesso em: 20 mar. 2019.

SILAEX. **SQ 2001 e SQ 3154**: sistema de resina epóxi. Disponível em: <http://silaex.com.br/datasheet/2001e3154.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2019.

SILAEX. **SQ 2220**: sistema de resina epóxi flexível. Disponível em: <http://silaex.com.br/datasheet/2220.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2019.

SOARES, R. G. **Efeito da adição de fibra de vidro particuladas nas propriedades mecânicas de resinas acrílicas utilizadas para confecção de placas oclusais**. 2010. Dissertação (Mestrado em Odontologia Restauradora Área de Concentração: Dentística) - Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2010.

STAMATO, G. C. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, Â.; MORAES, P. D. **Estruturas de madeira**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

TRADITIONAL timber frame joinery. **Vermont Timber Works**. Disponível em: <https://www.vermonttimberworks.com/learn/timber-frame-joinery/traditional/>. Acesso em: 1 mar. 2019.

ANEXO 1 – BOLETIM TÉCNICO - SISTEMA DE RESINA EPÓXI SQ2001 / SQ3154



Rua Santa Ubaldesca, nº 191 - Jaguaré - 05323-050 - São Paulo - SP
Tel. (PABX): 11- 3766-7202

www.silaex.ind.br e-mail: silaex@silae.com.br

SQ 2001 e SQ 3154 SISTEMA DE RESINA EPÓXI

APRESENTAÇÃO

Este sistema epóxi é indicado para ser usado em formulações isentas de solventes e que necessitem de transparência ou boa retenção de cores. Sistemas curados com este endurecedor não apresentam superfície oleosa ("blushing") mesmo quando usados à temperatura ambiente, sendo ou não em película.

VANTAGENS

- Excelente transparência e boa retenção de cores
- Boa fluidez
- Facilidade de Processamento
- Contração mínima. Não libera subprodutos.
- Excelentes propriedades dielétricas com alta isolamento.
- Resistência química elevada, especialmente ao intemperismo e umidade.
- Estabilidade aos ciclos térmicos, impactos e ações mecânicas.
- Boa adesão. Resistência mecânica.
- Fácil impregnação na aplicação em laminação.

CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES

	Resina SQ 2001	Endurecedor SQ 3154
Aparência	Líquido incolor viscoso	Líquido levemente amarelado
Viscosidade, 20° C, cPs	10.000 a 14.000	200 máx.
Peso Específico, 20° C, g/cm ³	1,16 +/- 0,01	1,005 +/- 0,015

PROPRIEDADES DO SISTEMA NÃO CURADO

Proporção de mistura (Resina: Endurecedor)	100:50 partes em peso
Temperatura de manipulação (°C)	18 - 30
Tempo de utilização da mistura 100 g (gel time) a 20° C	20 a 30 min.
Tempo de endurecimento da mistura (100 g em película, 20° C)	3 a 4 horas
Cura total a 20° C	7 dias

PROPRIEDADES DO SISTEMA CURADO

Temperatura de Deflexão Térmica(HDT) (°C)	95 - 100
Força de Compressão (psi)	5000
Força de Tensão (psi)	3000 - 6200
Elongação (%)	2,8
Impacto Izod (ft lb/in)	0,2 – 0,6
Dureza Barcol	Mín. 30

RESINA BASE

A resina epóxi base do sistema é um produto líquido, resultante da reação da Epícloridrina com o Bisfenol A.

ENDURECEDOR

2001e3154/cs/mai/13/jun/17



Rua Santa Ubaldesca, nº 191 - Jaguaré - 05323-050 - São Paulo - SP

Tel.(PABX): 11- 3766-7202

www.silaex.ind.br e-mail: silaex@silaex.com.br

O endurecedor à base de poliamina modificado promove a melhor adesão com boa resistência térmica, química e mecânica com baixa exotermia, possuindo boa solubilização na resina com proporções não críticas, permitindo cura homogênea com boa velocidade e propriedades finais bastante controláveis.

ARMAZENAGEM

Resinas epóxi são estáveis por um longo período de tempo à temperatura ambiente. Devem ser armazenados em locais seco e ventilado entre 18 a 30° C preferencialmente nas embalagens originais. Vida útil: Dentro das especificações de armazenagem, as embalagens não abertas tem vida útil garantida de no mínimo 12 (doze) meses, todavia o material pode resistir vários meses mais.

TOXICOLOGIA

❖ Riscos a serem observados no manuseio da resina

Pele: A resina epóxi é essencialmente não irritante a pele, todavia pode causar sensibilidade.

A susceptibilidade a irritações de pele ou sua sensibilidade varia de pessoa para pessoa.

Inalação: Inalação de vapores de não é considerada um problema, a não ser que a resina esteja aquecida quando poderá causar leve irritação das vias aéreas superiores se a exposição for prolongada.

Ingestão: A resina apresenta baixa toxicidade oral.

Contato com os olhos: O contato com os olhos pode resultar somente em uma leve irritação temporária.

❖ **Riscos a serem observados no manuseio do endurecedor**

O endurecedor é potencialmente capaz de causar irritações de pele e dos olhos, às vezes queimaduras, dependendo da severidade do contato. Usar EPI adequado.

PRECAUÇÕES NO MANUSEIO DO SISTEMA

- ⇒ Instruções contínuas ao pessoal envolvido no manuseio dos compostos químicos deverão ser dadas no que tange às consequências do contato com a pele, olhos e inalação, tanto quanto as precauções necessárias para a operação segura.
- ⇒ Resinas epóxi e seus endurecedores podem causar intoxicações e portanto devem ser manuseadas com segurança, seguindo três princípios básicos:
 - EVITE CONTATO COM A PELE OU COM OS OLHOS
 - EVITE INALAR VAPORES
 - EVITE A INGESTÃO
- ⇒ Vestimenta apropriada e EPI's são desejáveis para evitar o contato. O tipo específico de vestimenta depende da operação a ser realizada. Vestimenta improvisada aumenta o risco de acidentes.
- ⇒ A contaminação da área de trabalho deve ser minimizada pelo emprego de recursos capazes de evitar esta contaminação, tais como mesas e aparelhos para processamento limpos e dispostos com segurança. O local de aplicação deve ser isolado de outras áreas de trabalho a fim de evitar a exposição de pessoas e equipamentos de áreas adjacentes.
- ⇒ O contato com o material pode ser evitado pelo uso de luvas ou papel absorvente em caso de derramamento.
- ⇒ A inalação de vapores pode ser prevenida com suficiente ventilação.

OBSERVAÇÕES

As informações e dados contidos neste boletim, correspondem aos nossos conhecimentos atuais corrigidos por pessoal técnico capacitado e confiável. Devem ser tomados como orientação, e indicações de uso não são sugestões para se infringir qualquer patente ou legislação. O usuário deverá testar o desempenho em suas condições específicas, contando com informações que possamos fornecer. Nossa responsabilidade restringe-se a qualidade do nosso material e a reposição do que comprovadamente esteja fora de nossos parâmetros, uma vez que não temos controle sobre os processos e usos por parte de terceiros.

2001e3154/cs/mai/13/jun/17

ANEXO 2 – BOLETIM TÉCNICO - SISTEMA DE RESINA EPÓXI FLEXÍVEL SQ2220 / SQ3154



Rua Santa Ubaldesca, nº 191 – Jaguaré – 05323-050 – São Paulo – SP
Tel.(PABX): 11- 3766-7202

www.silaex.ind.br e-mail: silaex@silae.com.br

SQ 2220 SISTEMA DE RESINA EPÓXI FLEXÍVEL

APRESENTAÇÃO

SQ 2220 é uma resina epóxi que reagindo com os endurecedores específicos forma um termofixo flexível. Por ser um material com 100% de sólidos mantém sua flexibilidade por um período indeterminado.

APLICAÇÕES

Apresentando baixa viscosidade e transparência, é especialmente indicada para uso em coberturas ("lentes") de etiquetas autoadesivas e coberturas decorativas. Um sistema curado com **SQ 2220** e o endurecedor **SQ 3154**, na proporção de 2:1 em peso, não apresenta superfície oleosa ("blushing") mesmo quando usados à temperatura ambiente, sendo ou não em película. Também possui boa flexibilidade, adesividade e tenacidade, qualificando-a para uso em construção civil, decoração, artesanato, encapsulamento eletroeletrônico, etc..

PROPRIEDADES

Aparência	Líquido claro
Viscosidade, 25° C, cPs	550 a 850
Peso específico, 25° C, g/cm ³	1,11 ± 0,02
Cor Gardner	2 máx.

MANIPULAÇÃO

A resina **SQ 2220** é essencialmente isenta de riscos acentuados, porém pode causar uma sensibilização temporária na pele de pessoas mais suscetíveis em caso de exposição excessiva. O endurecedor SQ 3154 é agressivo à pele; assim, recomenda-se usar EPI's (Equipamento de Proteção Individual) tais como luvas, óculos e uma vestimenta de mangas compridas para manipulação segura. Também devem ser seguidas as normas de manipulação de produtos químicos em geral. Em caso de contato com pele, mucosas ou olhos, lavar com água em abundância e encaminhar ao médico em caso de sensibilização ou queimadura, informando a natureza do produto. Tratamento sintomático.

ARMAZENAGEM


Deve ser armazenado em local seco e abrigado, sob temperatura de 18° C a 30° C, nas embalagens originais de preferência. Por ser levemente higroscópico, evitam-se problemas com a umidade deixando-a periodicamente sob 70° C por 3 a 4 horas em recipiente destampado, fechando após o aquecimento. Sob estas condições o tempo de estocagem é de pelo menos 12 meses.

OBSERVAÇÕES

As informações e dados contidos neste boletim, correspondem aos nossos conhecimentos atuais coligidos por pessoal técnico capacitado e confiável. Devem ser tomados como orientação, e indicações de uso não são sugestões para se infringir qualquer patente ou legislação. O usuário deverá testar o desempenho em suas condições específicas, contando com informações que possamos fornecer. Nossa responsabilidade restringe-se a qualidade do nosso material e a reposição do que comprovadamente esteja fora de nossos parâmetros, uma vez que não temos controle sobre os processos e usos por parte de terceiros.

ANEXO 3 – BOLETIM TÉCNICO - FIBRA DE VIDRO PICADA 238 F – OWENS CORNING

PRODUCT INFORMATION



OWENS CORNING
INNOVATIONS FOR LIVING™

238F

Fibra Picada para Reforço em Resinas Fenólicas, Epóxi, Baquelite e Poliéster Insaturado

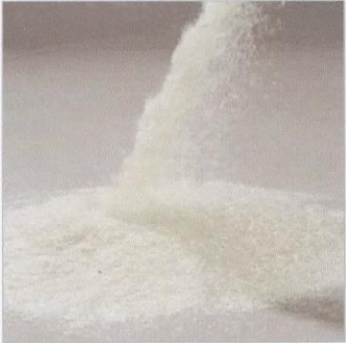
DESCRIÇÃO DO PRODUTO

As fibras picadas **238F** são fabricadas com o vidro Advantex® a partir de filamentos contínuos unidos em mechas, os quais recebem recobrimento químico adequado para interação com resinas fenólicas, epóxi, baquelite e poliéster insaturado.

Estas fibras representam uma nova tecnologia de produção desenvolvida pela Owens Corning, o que confere melhor desempenho nas etapas de processamento e também propriedades diferenciadas na aplicação final.

APLICAÇÃO DO PRODUTO

A **238F** é desenhada para aplicação em processos de mistura, compressão, prensagem e moldagem por injeção, apresentando desempenho diferenciado na aplicação final, como por exemplo, em Sistemas de Fricção e BMC (*Bulk Molding Compound*).



CARACTERÍSTICAS E BENEFÍCIOS DO PRODUTO

<ul style="list-style-type: none"> Excelente característica de fluxo em sistemas de dosagem e mistura. 	<ul style="list-style-type: none"> Excelente molhabilidade.
<ul style="list-style-type: none"> Interação adequada com resinas fenólicas, epóxi, baquelite e poliéster insaturado. 	<ul style="list-style-type: none"> Facilidade de dispersão e homogeneização em processos mistura a seco e em BMC.
<ul style="list-style-type: none"> Elevação de propriedades mecânicas do compósito final. 	<ul style="list-style-type: none"> Tempo de mistura reduzido, devido às características das mechas.
<ul style="list-style-type: none"> Integridade de mecha adequada aos processos de mistura. 	<ul style="list-style-type: none"> Produzido sob certificação ISO 9001, ISO 14001 e OHSAS 18001.

238F

Fibra Picada para Reforço em Resinas Fenólicas, Epóxi, Baquelite e Poliéster Insaturado

PRODUTOS DISPONÍVEIS

Teor nominal de sólidos	0,95%
Comprimento nominal	4mm

EMBALAGEM

As fibras picadas **238F** estão disponíveis na seguinte embalagem:

- *Bulk bags* fabricados em polietileno com quantidade de 1100Kg.
- Embalagem de Polietileno contendo 25kg de fibra picada cada, acomodadas em paletes de madeira com peso líquido total de 1000 kg.

ARMAZENAGEM

A Owens Corning recomenda que as fibras de vidro sejam mantidas em sua embalagem original, em ambiente seco e protegidas de intempéries até o momento da utilização.

As condições de armazenagem recomendadas são temperaturas entre 15 e 35°C e umidade relativa do ar entre 35 e 65%.

Mantidas as condições de estocagem descritas acima e a embalagem original, não é determinado prazo de validade para as fibras picadas, porém é recomendado que sejam re-analisadas após 3 anos de sua data de fabricação visando garantir suas propriedades.



INNOVATIONS FOR LIVING™

OWENS CORNING
OC BRASIL
Av. Brasil, 2567 - Rio Claro - SP
CEP: 13.505-600
Brasil
0800-707 3312
www.owenscorning.com.br

OWENS CORNING
COMPOSITE MATERIALS, LLC
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GET.PINK®
www.owenscorning.com
www.ocvreinforcements.com

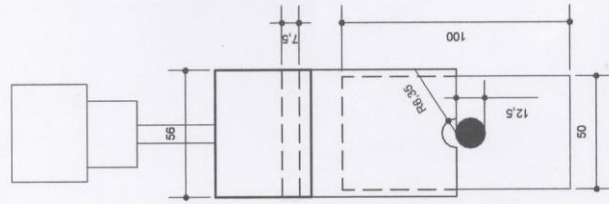


Isenção de responsabilidade e advertências:

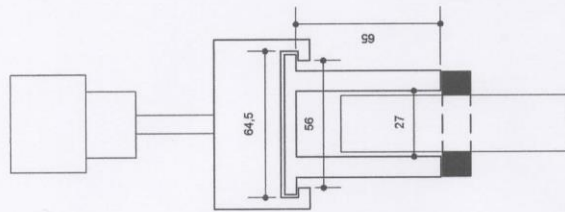
Estas informações são baseadas em testes conduzidos pela Owens Corning. Acreditamos que as informações sejam confiáveis, mas não garantimos sua aplicabilidade ao processo do usuário nem assumimos qualquer responsabilidade por ocorrências derivadas de seu uso. O usuário ao aceitar o aqui descrito, concorda em se tornar responsável por fazer testes em qualquer aplicação de modo completo antes de iniciar a produção. Nossas recomendações não devem ser tomadas como indução à infração de qualquer patente ou a violação de qualquer lei, código de segurança ou legislação de seguro.

A Owens Corning se reserva no direito de modificar esse documento sem aviso prévio. © 2012 Owens Corning. Todos os Direitos Reservados.
232F_Port

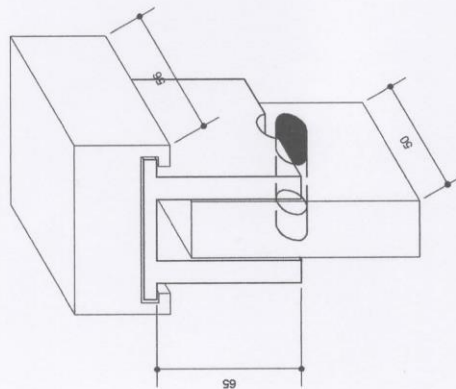
ANEXO 4 – DESENHO DO APARELHO DE CARREGAMENTO UTILIZADO NA FASE 1 DE ENSAIOS



ELEVAÇÃO FRONTAL
ESC. 1:2,5



ELEVAÇÃO LATERAL
ESC. 1:2,5



PERSPECTIVA
ESC. 1:2,5

ANEXO 5 - PROTOCOLO DE ENSAIOS – FASE 1- CAVILHAS DE MADEIRA E DE COMPÓSITO

Dados diagrama tensão/deformação:

- . Deformação - % (mm); e módulo de elasticidade
- . Carga inicial, carga limite, carga de rendimento (tensão de escoamento) e estado limite último (ruptura) - MPa
- . No diagrama utilizar reta paralela referente às cargas de cálculo igual a 5% do diâmetro da cavilha (0.625mm)

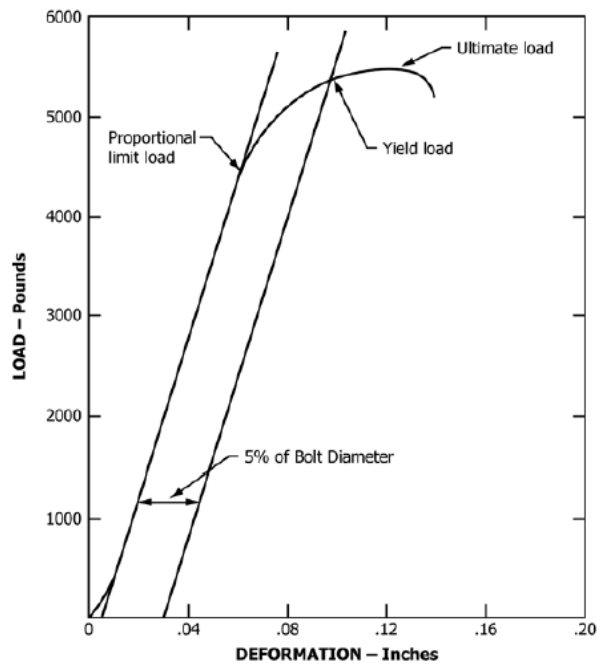


FIG. 6 Definition of Loads Obtained from the Load-Deformation Curve

Dados complementares:

- . Reportar umidade das peças submetidas a ensaio: cavilha e berço, preferencialmente U=12%
- . Serão 12 cavilhas ($\varnothing=12.5 \times 60$ mm) de cada material, madeira e compósito.

Comparar:

- . Módulo de elasticidade e tensão de escoamento das diferentes cavilhas.

ANEXO 6 - PROTOCOLO PARA ELABORAÇÃO DE CAVILHAS PRÉ – FABRICADAS DE COMPÓSITO – (60 mm) - (SISTEMA SQ 2001 / SQ 3154)

MATERIAIS PARA CAVILHAS DE COMPÓSITO:

- *Sistema de resina epóxi SQ 2001 / SQ 3154
- *Receita para elaboração cavilhas de compósito resina epóxi e fibra de vidro, para cavilhas com 60 mm de comprimento.
- *Recipiente para mistura com capacidade de 45 ml (pote descartável)
- *Haste de madeira, com extremidades arredondadas para mistura dos materiais (Palito de sorvete)
- *Seringas de plástico de 3 ml, para cada componente, com objetivo de transferir o material do recipiente original para aquele que será realizada a mistura
- *Matrizes para conformação das cavilhas (mangueira plástica de 12,7 mm de diâmetro, conformada para cavilhas de 60 mm.
- *Luvas descartáveis
- *Avental (jaleco)
- *Máscara de proteção
- *Óculos de segurança
- *Desmoldante para a resina epóxi
- *Hastes de bambu para acomodação / compactação do compósito nas matrizes
- *Funil com extremidade preparada para transferência de conteúdo do recipiente de mistura para a matriz
- *Fibra de vidro particulada
- *Flanela para limpeza
- *Gabarito para deixar matrizes na posição vertical enquanto ocorre a cura
- *Colher de metal para pegar fibra de vidro.
- *Recipiente para armazenar lixo

MÉTODO DE CONFEÇÃO DAS CAVILHAS DE COMPÓSITO:

1. Pesas em recipiente apropriado e individual a fibra de vidro;
2. Pesas, na quantidade prevista, em recipiente para mistura de 45 ml, a resina epóxi SQ 2001;
3. Acrescentar à resinas a fibra de vidro já pesada na proporção individual;
4. Misturar a resinas com a fibra de vidro, por um período de 3 minutos, tornando a mistura homogênea;
5. Acrescentar o endurecedor, na proporção dimensionada, ao compósito em formação;
6. Misturar o respectivo compósito por 3 minutos, tornando a mistura homogênea;
7. Pegar uma matriz para conformação da cavilha de compósito e o funil com a ponta preparada para encaixar na extremidade aberta da matriz;
8. Aplicar o desmoldante na matriz e nas paredes internas do funil
9. Transferir o conteúdo misturado para o funil e com auxílio de uma haste de madeira, acondicioná-lo dentro da matriz. Aproximadamente a cada 25% do material inserido na matriz, fazer a acomodação suave deste, com o auxílio da haste; totalizando 4 acomodações;
10. Retirar o funil, limpando resíduos deste;
11. Pressionar com os dedos a extremidade da matriz cujo material foi inserido, acomodando-o, tendo o cuidado para observar se está distribuído de forma homogênea, sem a formação área que comprometam o diâmetro desejado;
12. Identificar o corpo de prova pela seqüência de elaboração, quem elaborou e a data / horário para rastreabilidade futura;
13. Acomodar as cavilhas elaboradas com o compósito, ainda dentro da matriz, no suporte preparado, na vertical e em ambiente de temperatura controlada, igual ou superior a 20 °C, aguardando por 7 dias a cura integral das mesmas.
14. Desmoldar as cavilhas das respectivas matrizes com o auxílio de um estilete para cortar a parede destas;
15. Transferir a identificação externa para a cavilha, propriamente dita;
16. Pesas as respectivas cavilhas e registrar a informação na etiqueta de identificação das mesmas.

**ANEXO 7 - PROTOCOLO PARA ELABORAÇÃO DE CAVILHAS PRÉ –
FABRICADAS DE COMPÓSITO – (64 mm) - (SISTEMAS: SQ 2001 /
SQ 3154 E SQ 2220 / SQ 3154)**

MATERIAIS PARA CAVILHAS DE COMPÓSITO:

- *Sistema de resina epóxi SQ 2001 / SQ 3154
- *Sistema de resina epóxi flexível SQ 2220 / SQ 3154
- *Receita para elaboração cavilhas de compósito resina epóxi e fibra de vidro, para cavilhas com 64 mm de comprimento.
- *Recipiente para mistura com capacidade de 100 ml (pote descartável)
- *Haste de madeira, com extremidades arredondadas para mistura dos materiais (Palito de sorvete)
- *Seringas de plástico de 3 ml, para cada componente, com o objetivo de transferir o material do recipiente original para aquele que será realizada a mistura
- *Matrizes para conformação das cavilhas (mangueira plástica de 12,7 mm de diâmetro, conformada para cavilhas de 64 mm.
- *Luvas descartáveis
- *Avental (jaleco)
- *Máscara de proteção
- *Óculos de segurança
- *Desmoldante para a resina epóxi
- *Hastes de bambu para acomodação do compósito nas matrizes
- *Funil com extremidade preparada para transferência de conteúdo do recipiente de mistura para a matriz
- *Fibra de vidro particulada
- *Flanela para limpeza
- *Gabarito para deixar matrizes na posição vertical enquanto ocorre a cura
- *Colher de metal para pegar fibra de vidro.
- *Recipiente para armazenar lixo

MÉTODO DE CONFECÇÃO DAS CAVILHAS DE COMPÓSITO:

1. Pesar em recipiente apropriado e individual a fibra de vidro;
2. Pesar, na quantidade prevista, em recipiente para mistura de 100 ml, a resina epóxi SQ 2001;
3. Pesar, acrescentando à resina anterior, no mesmo recipiente, a quantidade prevista de resina epóxi SQ 2220;
4. Misturar as duas resinas, mexendo de forma suave (para não formar bolhas), por um período de 3 minutos, tornando a mistura homogênea;
5. Acrescentar às duas resinas a fibra de vidro já pesada na proporção individual;
6. Misturar o compósito das duas resinas com a fibra de vidro, por um período de 3 minutos, tornando a mistura homogênea;
7. Acrescentar o endurecedor, na proporção dimensionada, ao compósito em formação;
8. Misturar o respectivo compósito por 3 minutos, tornando a mistura homogênea;
9. Pegar uma matriz para conformação da cavilha de compósito e o funil com a ponta preparada para encaixar na extremidade aberta da matriz;
10. Aplicar o desmoldante na matriz e nas paredes internas do funil
11. Transferir o conteúdo misturado para o funil e com auxílio de uma haste de madeira, acondicioná-lo dentro da matriz. A aproximadamente $\frac{1}{4}$ do material inserido na matriz, fazer a acomodação suave deste, com o auxílio da haste; totalizando 4 acomodações;
12. Retirar o funil, limpando resíduos deste;

13. Pressionar com os dedos a extremidade da matriz cujo material foi inserido, acomodando-o, tendo o cuidado para observar se está distribuído de forma homogênea, sem a formação área que comprometam o diâmetro desejado;
14. Identificar o corpo de prova pela seqüência de elaboração, quem elaborou e a data / horário para rastreabilidade futura;
15. Acomodar as cavilhas elaboradas com o compósito, ainda dentro da matriz, no suporte preparado, na vertical e em ambiente de temperatura controlada, igual ou superior a 20 °C, aguardando por 7 dias a cura integral das mesmas.
16. Desmoldar as cavilhas das respectivas matrizes com o auxílio de um estilete para cortar a parede destas;
17. Transferir a identificação externa para a cavilha, propriamente dita;
18. Pesar as respectivas cavilhas e registrar a informação na etiqueta de identificação das mesmas.

**ANEXO 8 – RECEITA PARA ELABORAÇÃO DAS CAVILHAS DE COMPÓSITO –
6,0 cm x 1,27 cm – SISTEMA DE RESINA EPÓXI SQ 2001 / SQ 3154
– FASE 1 DE ENSAIOS**

1) Volume total da cavilha de compósito:

- r = Raio da circunferência 0,635 cm
- c = Comprimento da cavilha 6,0 cm
- v = Volume da cavilha = $v = \pi r^2 * c$ (cm³)
 - $v = \pi r^2 * c$
 - $v = 3,1415 * (0,635 * 0,635) * 6,0$
 - $v = 3,1415 * 0,4032 * 6,0$
 - $v = 7,599 \text{ cm}^3$**

2) Percentual dos componentes do compósito: matriz (resina) e estrutural (fibra de vidro):

- Matriz (resina) = 60 %
 - 60 % do volume da cavilha = 4,559 cm³**
- Estrutural (fibra) = 40 %
 - 40 % do volume da cavilha = 3,039 cm³**

3) Quantidade de fibra (em gramas - g):

- Volume de fibra da cavilha = 3,039 cm³
- Peso específico da fibra = 2,62 g/cm³
- Quantidade de fibra = 3,039 * 2,62 = 7,963 g
- Quantidade de fibra + 5 % de perdas = **8,361 g**

4) Quantidade de resina para o sistema SQ 2001 / SQ 3154:

- Volume da cavilha em resina epóxi = 4,559 cm³
- Peso específico da resina epóxi SQ 2001 = 1,08 g / cm³
- Quantidade de resina sistema SQ 2001 / SQ 3154 = 1,823 * 1,08 = 4,923 g
- Quantidade de resina sistema SQ 2001 / SQ 3154 + 5 % = **5,169 g**
- **Quantidade de resina SQ 2001 = 3,446 g** (com 5 % de perda)
- **Quantidade de endurecedor SQ 3154 = 1,723 g** (com 5 % de perda)

5) Resumo – Quantidade dos elementos para cavilha de compósito com volume de 7,599 cm³ (com 5 % de perdas):

- Fibra de vidro = **8,361 g**
- Resina SQ 2001 = **3,446 g**
- Endurecedor SQ 3154 = **1,723 g**

**ANEXO 9 – RECEITA PARA ELABORAÇÃO DAS CAVILHAS DE COMPÓSITO –
6,4 cm x 1,27 cm – SISTEMA DE RESINA EPÓXI SQ 2001 / SQ 3154 e
SQ 2220 / SQ3154 – FASE 2 DE ENSAIOS**

1)Volume total da cavilha de compósito:

- r = Raio da circunferência 0,635 cm
- c = Comprimento da cavilha 6,4 cm
- v = Volume da cavilha = $v = \pi r^2 * c$ (cm³)
 - $v = \pi r^2 * c$
 - $v = 3,1415 * (0,635 * 0,635) * 6,4$
 - $v = 3,1415 * 0,4032 * 6,4$
 - $v = 8,107 \text{ cm}^3$

2)Percentual dos componentes do compósito: matriz (resina) e estrutural (fibra de vidro):

- Matriz (resina) = 60 %
 - 60 % do volume da cavilha = 4,864 cm³**
- Estrutural (fibra) = 40 %
 - 40 % do volume da cavilha = 3,242 cm³**

3)Quantidade de fibra (em gramas - g):

- Volume de fibra da cavilha = 3,242 cm³
- Peso específico da fibra = 2,62 g/cm³
- Quantidade de fibra = 3,039 * 2,62 = 8,49 g
- Quantidade de fibra + 5 % de perdas = **8,914 g**

4)Quantidade de resina para o sistema SQ 2001 / SQ 3154:

- Volume da cavilha em resina epóxi = 4,864 cm³
- Resina epóxi do sistema SQ 2001 / SQ 3154 (40 %) = 1,945 cm³
- Peso específico da resina epóxi SQ 2001 = 1,08 g / cm³
- Quantidade de resina sistema SQ 2001 / SQ 3154 = 1,823 * 1,08 = 2,101 g
- Quantidade de resina sistema SQ 2001 / SQ 3154 + 5 % = **2,206 g**
- **Quantidade de resina SQ 2001 = 1,470 g** (com 5 % de perda)
- **Quantidade de endurecedor SQ 3154 = 0,735 g** (com 5 % de perda)

5)Quantidade de resina para o sistema SQ 2220 / SQ 3154 (Resina epóxi flexível):

- Volume da cavilha em resina epóxi = 4,864 cm³
- Resina epóxi do sistema SQ 2220 / SQ 3154 (60 %) = 2,918 cm³
- Peso específico da resina epóxi SQ 2220 = 1,06 g / cm³
- Quantidade de resina sistema SQ 2220 / SQ 3154 = 2,735 * 1,06 = 3,093 g
- Quantidade de resina sistema SQ 2220 / SQ 3154 + 5 % = **3,247 g**
- **Quantidade de resina SQ 2220 = 2,165 g** (com 5 % de perda)
- **Quantidade de endurecedor SQ 3154 = 1,082 g** (com 5 % de perda)

6)Resumo – Quantidade dos elementos para cavilha de compósito com volume de 8,107 cm³ (com 5 % de perdas):

- Fibra de vidro = **8,914 g**

- Resina SQ 2001 = **1,470 g**
- Resina SQ 2220 = **2,165 g**
- Endurecedor SQ 3154 = **1,817 g**

**ANEXO 10 – RECEITA PARA ELABORAÇÃO DAS CAVILHAS DE COMPÓSITO –
6,0 cm x 1,27 cm – SISTEMA DE RESINA EPÓXI SQ2001 / SQ3154 –
TESTE COM PERCENTUAIS DE 10%, 30%, 50% E 70%.**

1) Volume total da cavilha de compósito:

- r = Raio da circunferência 0,635 cm
- c = Comprimento da cavilha 6,0 cm
- v = Volume da cavilha = $v = \pi r^2 * c$ (cm³)

$$v = \pi r^2 * c$$

$$v = 3,1415 * (0,635 * 0,635) * 6,0$$

$$v = 7,596 \text{ cm}^3$$

2) Percentual dos componentes do compósito: matriz (resina) e estrutural (fibra de vidro):

- Matriz (resina) = 60 %
60 % do volume da cavilha = 4,557 cm³
- Estrutural (fibra) = 40 %
40% do volume da cavilha = 3,038 cm³

3) Quantidade de fibra (em gramas - g):

- Volume de fibra da cavilha = 3,038 cm³
- Peso específico da fibra = 2,62 g/cm³
- Quantidade de fibra = 3,038 * 2,62 = 7,959 g
- Quantidade de fibra + 5 % de perdas = **8,3569 g**

4) Quantidade de resina para o sistema SQ 2001 / SQ 3154 (peso específico médio 1,08g/cm³) e SQ 2220 / SQ 3154 (peso específico médio 1,06 g/m³), nos percentuais de :

4.1) 10% sistema SQ 2220 / SQ 3154:

- *Volume da cavilha em resina epóxi = 4,557 cm³
- Aonde: 10% resina SQ 2220 = 0,338 g
- 90% resina SQ 2001 = 3,099 g
- Endurecedor SQ 3154 = 1,7188 g
- (obs: todos com acréscimo de 5% para possíveis perdas)

4.2) 30% sistema SQ 2220 / SQ 3154:

- *Volume da cavilha em resina epóxi = 4,557 cm³
- Aonde: 30% resina SQ 2220 = 1,014 g
- 70% resina SQ 2001 = 2,410 g
- Endurecedor SQ 3154 = 1,7124 g
- (obs: todos com acréscimo de 5% para possíveis perdas)

4.3) 50% sistema SQ 2220 / SQ 3154:

- *Volume da cavilha em resina epóxi = 4,557 cm³
- Aonde: 50% resina SQ 2220 = 1,774 g
- 50% resina SQ 2001 = 1,722 g
- Endurecedor SQ 3154 = 1,624 g
- (obs: todos com acréscimo de 5% para possíveis perdas)

4.4) 70% sistema SQ 2220 / SQ 3154:

*Volume da cavilha em resina epóxi = 4,557 cm³

Aonde: 70% resina SQ 2220 = 2,365 g

30% resina SQ 2001 = 1,033 g

Endurecedor SQ 3154 = 1,698 g

(obs: todos com acréscimo de 5% para possíveis perdas.

ANEXO 11 – TABELA COM RESULTADOS DE ENSAIO DA FASE 1 – CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE MADEIRA

RESULTADO DE ENSAIO DA FASE 1 - CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE MADEIRA

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (N)
CP 1 T 151	3,30	27,9	67,91
CP 2 T146	2,95	32,6	59,80
CP 3 T 147	3,55	38,1	71,74
CP 4 T 149	3,05	31,4	61,57
CP 5 T 145	3,60	43,2	72,44
CP 6 150	3,25	35,6	66,57
CP 7 T 155	2,60	43,4	57,49
CP 8 T 148	4,00	42,5	78,56
CP 9 T 153	2,25	23,4	45,62
CP 10 T 154	3,10	35,7	64,58
CP 11 T 157	2,90	36,7	59,44
CP 12 T 152	3,75	31,3	76,48
MÉDIA	3,19	35,15	65,18
DESV. P.	0,49	6,21	9,19
COEF. VAR. (%)	15,48	17,67	14,10

Fonte: Autor.

ANEXO 12 – TABELA COM RESULTADOS DE ENSAIO DA FASE 1 – CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE COMPÓSITO SISTEMA RESINA EPÓXI SQ 2001 / SQ 3154

RESULTADO DE ENSAIO DA FASE 1 - CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE COMPOSITO DO SISTEMA RESINA EPÓXI SQ 2001 / SQ3154

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (N)
CP 1 T 229	2,55	31,0	53,90
CP 2 T 240	1,70	31,2	37,98
CP 3 T 236	1,30	23,5	27,24
CP 4 T 230	1,35	21,2	30,78
CP 5 T 237	1,65	31,0	35,45
CP 6 T 234	2,85	31,1	57,77
CP 7 T 231	1,60	19,3	34,84
CP 8 T 233	2,20	39,3	48,26
CP 9 T 228	3,05	45,9	62,08
CP 10 T 407	2,40	16,5	49,38
CP 11 T 409	2,80	29,7	58,06
CP 12 T 410	2,60	29,0	60,13
CP 13 T 411	2,75	22,9	60,42
CP 14 T 412	2,40	23,4	47,87
CP 15 T 238	2,35	45,9	49,24
CP 14 T 241	1,05	21,3	41,89
MÉDIA	2,16	28,89	47,21
DESV. P.	0,63	8,81	11,32
COEF. VAR. (%)	29,09	30,49	23,97

Fonte: Autor.

ANEXO 13 – TABELA COM RESULTADOS DE ENSAIO DA FASE 1 – CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE COMPÓSITO SISTEMA RESINA EPÓXI SQ 2001 / SQ 3154 COM PERCENTUAIS DE 10%, 30%, 50% E 70% DO SISTEMA DE RESINA EPÓXI SQ2220 /SQ3154

RESULTADO DE ENSAIO DA FASE 1- CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE COMPOSITO COM PERCENTUAL DE 10% DE RESINA FLEXÍVEL

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (N)
CP 1 T 325	1,65	13,8	34,58
CP 2 T 326	3,05	50,7	64,47
CP 3 T 327	1,65	13,7	34,04
MÉDIA	2,12	26,1	44,36
DESV. P.	0,66	17,4	14,22
COEF. VAR. (%)	31,2	66,8	32,05

RESULTADO DE ENSAIO DA FASE 1- CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE COMPOSITO COM PERCENTUAL DE 30% DE RESINA FLEXÍVEL

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (N)
CP 1 T 328	2,60	32,8	52,82
CP 2 T 329	2,00	22,0	41,31
CP 3 T 330	2,65	46,0	52,89
MÉDIA	2,42	33,6	49,01
DESV. P.	0,30	9,8	5,44
COEF. VAR. (%)	12,2	29,2	11,11

RESULTADO DE ENSAIO DA FASE 1- CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE COMPOSITO COM PERCENTUAL DE 50% DE RESINA FLEXÍVEL

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (N)
CP 1 T 331	2,85	49,3	59,00
CP 2 T 332	2,85	28,5	57,88
CP 3 T 333	3,05	23,8	63,20
MÉDIA	2,92	33,9	60,03
DESV. P.	0,09	11,1	2,29
COEF. VAR. (%)	3,2	32,8	3,81

RESULTADO DE ENSAIO DA FASE 1- CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE COMPOSITO COM

PERCENTUAL DE 60% DE RESINA FLEXÍVEL			
CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (N)
CP 1 T 356	1,40	14,4	34,08
CP 2 T 357	2,25	21,1	49,45
CP 3 T 358	2,65	25,2	61,68
MÉDIA	2,10	20,2	48,40
DESV. P.	0,52	4,5	11,29
COEF. VAR. (%)	24,8	22,0	23,33

RESULTADO DE ENSAIO DA FASE 1- CORPO DE PROVA COM CAVILHA DE COMPOSITO COM PERCENTUAL DE 70% DE RESINA FLEXÍVEL			
CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA DA CAVILHA - PARA UMA SECÇÃO DE CORTE (kN)	RIGIDEZ DA LIGAÇÃO (kN/cm)	FORÇA MÁXIMA (N)
CP 1 T 334	2,40	22,3	48,33
CP 2 T 357	2,40	9,5	51,99
CP 3 T 358	3,05	25,7	61,90
MÉDIA	2,62	19,2	54,07
DESV. P.	0,31	7,0	5,73
COEF. VAR. (%)	11,7	36,4	10,60
