



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

GABRIEL ALCÂNTARA DOURADO DE OLIVEIRA E SILVA

**REFORÇO DE CAVILHAS DE MADEIRA COM RESINA POLIMÉ-
RICA E FIBRA DE CARBONO PARA APLICAÇÃO ESTRUTURAL**

Salvador
2020

GABRIEL ALCÂNTARA DOURADO DE OLIVEIRA E SILVA

**REFORÇO DE CAVILHAS DE MADEIRA COM RESINA POLIMÉ-
RICA E FIBRA DE CARBONO PARA APLICAÇÃO ESTRUTURAL**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César

Coorientadora: Profa. Dra. Rita Dione Araújo Cunha

Agência Financiadora: CAPES

Salvador
2020

S586 Silva, Gabriel Alcântara Dourado de Oliveira e.
Reforço de cavilhas de madeira com resina polimérica e fibra
de carbono para aplicação estrutural / Gabriel Alcântara Dourado
de Oliveira e Silva – Salvador, 2020.
117f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César.
Coorientadora: Profa. Dra. Rita Dione Araújo Cunha.

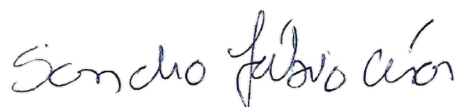
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2020.

1. Estruturas de madeira (Construção civil). 2. Ligações
cavilhadas. 3. Fibra de carbono. 4. Tecnologia da madeira. 5.
Polímeros. I. César, Sandro Fábio. II. Cunha, Rita Dione Araújo.
III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD.: 624.184

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
GABRIEL ALCÂNTARA DOURADO DE OLIVEIRA E SILVA
APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DA BAHIA, EM 15 DE JULHO DE 2020.

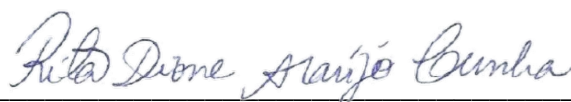
BANCA EXAMINADORA



Prof.(a) Dr.(a) **Sandro Fábio César**

Orientador

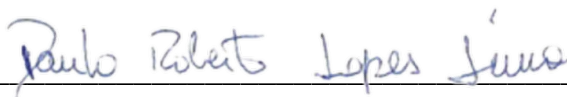
PPEC-UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Rita Dione Araújo Cunha**

Coorientadora

PPEC-UFBA



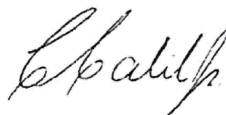
Prof.(a) Dr.(a) **Paulo Roberto Lopes Lima**

PPEC-UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Adriano Silva Fortes**

PPG-IFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Carlito Calil Junior**

PPGSET-USP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço aos meus pais, Simone e Augusto Dourado, o apoio, o carinho, o amor, a paciência e o incentivo.

Ao professor Dr. Sandro Fábio César e à professora Dra. Rita Dione Araújo Cunha, agradeço a atenção, a paciência, a amizade e a orientação.

À Escola Politécnica da UFBA e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPEC), agradeço a oportunidade de realizar o curso de Mestrado. É uma satisfação enorme fazer parte da história desta escola e poder contribuir com a ciência por meio deste trabalho.

Aos professores Paulo César de Jesus Sant'Anna e Daniel Vêras Ribeiro e aos funcionários e técnicos da Politécnica e do Laboratório de Madeira Marco Araújo e Edenilson Reis, agradeço a disponibilidade e a ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a todos os amigos do Labmad que, no laboratório, compartilham da experiência e das dificuldades da pós-graduação, em especial à Caroline Silva Sena e ao Filipe Luigi Dantas Lima Santos; e aos colegas contemporâneos do PPEC que se colocaram à disposição para ajudar na realização dos ensaios, Nilson Santana de Amorim Junior, Ruan Carlos de Araújo Moura e Kuelson Ranello Dantas Maciel.

Agradeço aos meus tios Selma, Robson, Sônia, Edvaldo e aos demais familiares e amigos, que são grandes incentivadores e não medem esforços para me ajudar.

À minha avó Malvina (*in memoriam*), agradeço o carinho, o amor e o incentivo aos estudos.

À CAPES, agradeço o suporte financeiro por meio de uma bolsa de estudos.

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

*“O ouro afunda no mar
Madeira fica por cima
Ostra nasce do lodo
Gerando pérolas finas”
(Ederaldo Gentil)*

RESUMO

As ligações são pontos críticos das estruturas de madeira: seu comportamento mecânico pode condicionar o desempenho global das estruturas. Diante disso, há uma procura por materiais que possam atender a diversas solicitações possíveis. No que se refere aos conectores para estruturas de madeira, a maior parte das inovações desenvolvidas são compostas por peças metálicas. Entretanto, os conectores metálicos estão sujeitos ao fenômeno da corrosão. A corrosão dos conectores metálicos compromete a durabilidade da ligação, influenciando na segurança da estrutura e no desempenho sustentável da construção. Nesse cenário, as cavilhas de madeira se constituem como uma possível alternativa ao emprego dos conectores metálicos. O objetivo deste trabalho é propor um conceito de reforço para cavilhas de madeira, formando um compósito com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC). Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica da madeira estudada, para propor sua utilização baseada em sua capacidade estrutural. Além disso, foram confeccionadas cavilhas reforçadas e protótipos de ligações que tiveram suas propriedades mecânicas investigadas por meio de ensaios experimentais. Como resultado, foi observado que as cavilhas reforçadas com fibra de carbono obtiveram um desempenho como conector estrutural superior ao das cavilhas não reforçadas com PRFC. Com base em métodos analíticos e experimentais, encontrou-se o valor do momento resistente para cavilhas de maçaranduba não reforçadas e reforçadas por meio da técnica proposta.

Palavras-chave: Ligações. Cavilhas de Madeira. Estruturas de madeira. Fibra de carbono. Resina polimérica.

ABSTRACT

Connections are critical points of wood structures. Their mechanical behavior can conditionate the overall performance of structures. On the face of it, there is a request for materials that can meet the various possible demands. Regarding connectors for wood structures, most of the innovations developed are composed of metal parts. However, metal connectors are subject to corrosion. Corrosion of the metal connectors compromises its durability, influencing the safety of the structure and the sustainable performance of the construction. In this scenario, the wooden pegs constitute a possible alternative to the use of metallic connectors. The objective of this work is to propose a new reinforcement concept for wood dowels forming a new composite with carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Physical and mechanical characterization of the studied wood were carried out to propose their use based on their structural capacity. In addition, reinforced dowels and link prototypes were fabricated and their mechanical properties investigated through experimental tests. As a result, it was observed that the wood dowels reinforced with carbon fiber obtained a performance as a structural connector superior to the dowels without CFRP. Through analytical and experimental methods, the value of the bending moment was found for unreinforced and reinforced dowels using the proposed technique.

Keywords: Joints. Wood dowels. Timber Structures. Carbon Fiber. Polymeric Resin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais tipos de ligações coladas.....	11
Figura 2 – Exemplo de ligações por entalhe	12
Figura 3 – Componentes utilizados em ligações do tipo entalhe.....	13
Figura 4 – Principais tipos de parafusos.	14
Figura 5 – Cavilhas e suas principais dimensões.....	15
Figura 6 – Conectores do tipo anel empregados em estruturas de madeira	15
Figura 7– Exemplo de disposição do conector do tipo anel em uma ligação ...	16
Figura 8 – Chapas de aço conformadas para ligações em estruturas de madeira	17
Figura 9 – Corpos de prova reforçados com PRF.....	18
Figura 10 – Degradação de conectores metálicos e formação de manifestações patológicas na madeira	19
Figura 11 – Mecanismos de plastificação em ligações madeira-madeira em corte duplo	22
Figura 12 – Ligações com cavilhas	24
Figura 13 – Principais componentes dos compósitos reforçados com fibras ...	31
Figura 14 – Esquema das possíveis distribuições do reforço no compósito em função dos diferentes parâmetros.....	35
Figura 15 – Esquema da classificação de reforços em compósitos	36
Figura 16 – Imagem da Maçaranduba tirada com estereomicroscópio.....	42
Figura 17 – Tecido de fibra de carbono bidirecional.....	42
Figura 18 – Árvore de critérios e de subcritérios da AHP.....	44
Figura 19 – Configuração do processo AHP	45
Figura 20 – 1ª etapa do programa experimental	50

Figura 21 – 2ª etapa do programa experimental	51
Figura 22 – 3ª etapa do programa experimental	52
Figura 23 – Máquinas utilizadas na fabricação dos corpos de prova	53
Figura 24 – Cavilhas na estufa para avaliação da estabilidade dimensional ...	58
Figura 25 – Equipamentos utilizados na etapa experimental	60
Figura 26– Realização do ensaio de umidade e densidade	61
Figura 27 – Máquinas de ensaio utilizadas nos ensaios destrutivos	63
Figura 28 – Detalhe dos corpos de prova de ensaio de compressão paralela às fibras	65
Figura 29 – Detalhe do corpo de prova de ensaio de compressão normal às fibras.	66
Figura 30 – Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.	67
Figura 31 – Ensaio de flexão estática	68
Figura 32 – Aparelho de ultrassom utilizado no ensaio não destrutivo	69
Figura 33 – Dimensões das peças de madeira para o utilizadas para o ensaio não destrutivo.....	69
Figura 34 – Detalhe dos corpos de prova do ensaio de flexão nas cavilhas	72
Figura 35 – Execução do ensaio de flexão da cavilha sem reforço.....	73
Figura 36 – Dimensões dos corpos de prova do para os ensaios na ligação ..	74
Figura 37 – <i>Box-plot</i> – ensaio de compressão paralela às fibras	78
Figura 38 – <i>Box-plot</i> – Ensaio de compressão normal às fibras	79
Figura 39 – <i>Box-plot</i> – ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	80
Figura 40 – <i>Box-plot</i> – Flexão estática	80
Figura 41 – <i>Box-plot</i> da distribuição das classes de resistência obtidas por ensaio não destrutivos.....	83

Figura 42 – <i>Box-plot</i> para o ensaio de flexão das cavilhas nas cavilhas.....	85
Figura 43 – Gráfico de regressão linear para a série submetida à compressão normal às fibras.....	89
Figura 44 – Gráfico de regressão linear para a série submetida à compressão paralela às fibras.....	90
Figura 45 – Ruptura das ligações submetidas a compressão normal às fibras	91
Figura 46 – Ruptura das ligações submetidas a compressão paralela às fibras	92
Figura 47 – Análise Microestrutural das cavilhas reforçadas	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de fibras vegetais.....	37
Quadro 2 – Características genéricas das fibras de carbono.....	38
Quadro 3 – Matriz de importância para cada critério.....	46
Quadro 4 – Relação entre as variáveis do critério flexibilidade.....	47
Quadro 5 – Desempenho das alternativas em relação à flexibilidade.....	48
Quadro 6 – Sequência de fabricação das cavilhas e os respectivos equipamentos utilizados.	54
Quadro 7 – Sequência de reforço das cavilhas e os respectivos equipamentos utilizados.	55
Quadro 8 – Sequência de fabricação dos corpos de prova utilizados no ensaio das ligações.	57
Quadro 9 – Problemas relativos à fabricação das ligações e as causas associadas	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente α_e para cálculo da resistência ao embutimento normal às fibras, sendo do diâmetro do pino	26
Tabela 2 – Avaliação final das alternativas	49
Tabela 3 – Resultados do ensaio de estabilidade dimensional em cavilhas com e sem reforço	59
Tabela 4 – Classificação por ultrassom da madeira de dicotiledônea (UD)	71
Tabela 5 – Resultados dos ensaios da caracterização física da madeira	76
Tabela 6 – Resultados para o ensaio de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}).....	77
Tabela 7 – Resultados para o ensaio de resistência a compressão normal às fibras	78
Tabela 8 – Resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	79
Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência a flexão estática	80
Tabela 10 – Comparação entre os valores das propriedades mecânicas das madeiras de maçaranduba.....	81
Tabela 11 – Resultados do ensaio de propagação de ondas sonoras.....	82
Tabela 12 – Resultados do ensaio de flexão das cavilhas.....	84
Tabela 13 – Estimativa da carga de rompimento dos corpos de prova para o ensaio de ligação	86
Tabela 14 – Carga de ruptura e cálculo do momento resistente para ligações submetidas à compressão normal às fibras	88
Tabela 15 - Carga de ruptura e cálculo do momento resistente para ligações submetidas à compressão paralela às fibras	88

Tabela 16 – Equações da regressão linear para o momento resistente das cavilhas.....	90
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	Análise Hierárquica dos Processos
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
CNC	Corte Numérico Computadorizado
CP	Corpo de prova
DLT	<i>Dowel Laminated Timber</i>
UFBA	Universidade Federal da Bahia
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
M_y	Momento resistente
PRF	Polímeros Reforçados com Fibras
PRFC	Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
Labmad	Laboratório de Madeiras da Universidade Federal da Bahia
f_{c0}	Resistência da madeira à compressão paralela às fibras
$f_{c0,d}$	Resistência da madeira à compressão paralela às fibras (valor de projeto)
f_{c90}	Resistência da madeira à compressão normal às fibras
$f_{c90,d}$	Resistência da madeira à compressão normal às fibras (valor de projeto)
f_M	Resistência da madeira à flexão
f_{v0}	Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras
$R_{vd,1}$	Resistência de cálculo da cavilha
ρ_{bas}	Densidade básica da madeira
ρ_{ap}	Densidade aparente da madeira
β	Parâmetro beta
β_{lim}	Parâmetro beta limite

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 PROPOSTA DO TRABALHO	3
1.1.1 <i>Problema de pesquisa</i>	3
1.1.2 <i>Hipótese</i>	3
1.1.3 <i>Objetivos</i>	3
1.1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	3
1.1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.1.4 <i>Delimitação da pesquisa</i>	4
1.1.5 <i>Justificativa</i>	5
1.1.6 <i>Metodologia da pesquisa</i>	6
1.1.7 <i>Estrutura da dissertação</i>	7
2 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS	9
2.1 TIPOS DE LIGAÇÕES.....	10
2.2 DEGRADAÇÃO DOS CONECTORES METÁLICOS	19
2.3 MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES CAVILHADAS.....	20
2.3.1 <i>Parâmetros de dimensionamento de ligações cavilhadas</i>	23
2.3.1.1 <i>Norma vigente – ABNT NBR 7190/97</i>	23
2.3.1.2 <i>Proposta de revisão da NBR 7190 e da Eurocode 5</i>	27
3 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)	31
3.1 MATRIZ DE UM COMPÓSITO	33
3.1.1 <i>Cura da resina epóxi</i>	34
3.2 REFORÇO COM FIBRAS.....	35
3.2.1 <i>Tipos de fibras</i>	36
3.3 PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS.....	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS	41

4.1 MATERIAIS	41
4.1.1 Madeira	41
4.1.1.1 Caracteres anatômicos.....	41
4.1.2 Fase dispersa – fibra de carbono.....	42
4.1.3 Fase matriz - resina epóxi.....	43
4.2 MÉTODOS	43
4.2.1 Matriz hierárquica para escolha da fibra.....	43
4.2.1.1 Relacionamento entre critérios.....	46
4.2.1.2 Relacionamento entre subcritérios.....	46
4.2.1.3 Desempenho das alternativas.....	47
4.2.1.4 Avaliação das alternativas.....	48
4.2.2 Programa experimental.....	49
4.2.3 Produção dos corpos de prova.....	52
4.2.3.1 Produção dos corpos de prova para o ensaio de caracterização.....	52
4.2.3.2 Produção das cavilhas reforçadas.....	54
4.2.3.3 Produção dos corpos de provas para o ensaio de resistência das ligações	56
4.2.4 Ensaio de caracterização das propriedades físicas da madeira.....	59
4.2.5 Ensaio de caracterização das propriedades mecânicas da madeira.....	62
4.2.5.1 Ensaio de compressão paralela às fibras.....	65
4.2.5.2 Ensaio de compressão normal às fibras.....	66
4.2.5.3 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	66
4.2.5.4 Ensaio de flexão estática.....	67
4.2.6 Ensaio não destrutivo – propagação de ondas sonoras.....	68
4.2.7 Ensaio de flexão nas cavilhas.....	71

<i>4.2.8 Ensaio de resistência das ligações</i>	73
<i>4.2.9 Análise microestrutural</i>	74
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA	76
5.1.1 <i>Propriedades físicas</i>	76
5.1.2 <i>Propriedades mecânicas</i>	77
5.1.2.1 Ensaio não destrutivo – propagação de ondas sonoras	82
5.2 AVALIAÇÃO DAS CAVILHAS REFORÇADAS	84
5.2.1 <i>Ensaio de flexão das cavilhas</i>	84
5.2.2 <i>Resistência das ligações cavilhadas</i>	86
5.2.3 <i>Análise microestrutural</i>	93
5.2.4 <i>Problemas de execução e os aspectos limitantes</i>	94
6 CONCLUSÕES	96
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
APÊNDICE	
ANEXOS	

1 INTRODUÇÃO

Por muito tempo, as ligações cavilhadas foram empregadas na construção de casas, de navios, de telhados e de pontes, usando conectores de seção circular feitos de madeira. O sucesso dessas estruturas é decorrente dos benefícios da eficiência estrutural; da resistência inerente às conexões; e, possivelmente, de boas práticas adotadas pelos construtores.

Devido à facilidade e à evolução dos conectores metálicos, sobretudo os parafusos e os conectores sob medida, o emprego das ligações cavilhadas passou a ser menos abrangente. No entanto, em ambientes de grande agressividade ambiental (edifícios construídos à beira mar, edifícios de indústrias químicas, galpões de armazenamento de produtos químicos), pinos e conectores metálicos empregados em ligações estão sujeitos a uma degradação acelerada por meio do processo de corrosão, um fator preocupante que pode colocar em risco a estabilidade estrutural.

De acordo com Calil Junior *et al.* (2003), a falha de uma conexão poderá ser responsável pelo colapso total da estrutura. Tal fato reforça a preocupação com a integridade dos elementos que compõem uma ligação, principalmente nas regiões litorâneas, onde a agressividade ambiental é maior.

A utilização de cavilhas em ligações de madeira tem aparecido como uma boa alternativa para conexões, devido às vantagens ambientais associadas ao uso da madeira como matéria-prima, em substituição ao aço; e à sua aplicação em estruturas localizadas em ambientes que comprometem a vida útil da estrutura, aumentando o trabalho de manutenção (GOMES, 1997; CALIL JÚNIOR *et al.*, 2003; PALMA *et al.*, 2014).

Embora as técnicas tradicionais de construção com cavilhas de madeira tenham obtido bastante sucesso ao longo do tempo, como é o caso das estruturas de grandes dimensões construídas pela empresa Hauff no Brasil entre 1929 e 1960 (CÉSAR, 1991), vários fatores apontam para a necessidade de se aplicar práticas modernas de engenharia ao projeto dessas estruturas. Nesse contexto, observam-se os esforços de diversos pesquisadores no sentido de aprimorar o emprego das ligações com cavilhas de madeira, entre os quais podem ser citadas as contribuições de Gomes (1997), por meio da impregnação das cavilhas

com resinas estirênicas; e de Gesualdo (1982), com a técnica das cavilhas bi-partidas.

Atualmente, novos produtos de madeira engenheirada propõem a retomada da utilização de cavilhas de madeira como elementos conectores, como o *Doweled Laminated Timber* (DLT), painel de madeira laminada conectado por cavilhas, por constituir uma alternativa aos demais sistemas construtivos, no que tange aos aspectos de sustentabilidade, de resistência mecânica, de economia e de diminuição do processo de degradação (PEREIRA; CALIL JÚNIOR., 2017). Além das vantagens listadas, diferentemente dos painéis ligados por conectores metálicos, os painéis cavilhados podem passar pelo processo de corte e de usinagem por meio da tecnologia CNC (corte numérico computadorizado) (DIAS, 2019).

O interesse por métodos de construção sustentáveis de baixo consumo energético tem fomentado a procura por inovações que possam melhorar as soluções atualmente adotadas. Assim, as cavilhas – ou conectores feitos em madeira – são interessantes, sobretudo pela resistência mecânica e pela maior durabilidade, quando são comparadas às alternativas.

Para utilização estrutural, as cavilhas de madeira, de acordo com versão mais recente da norma para projetos de estruturas de madeiras NBR 7190 (ABNT, 1997), devem ser fabricadas em madeira maciça, podendo ser feitas de madeiras duras (classe C60) ou de madeiras moles impregnadas com resinas que aumentem sua resistência. De acordo com Gomes (1997), a impregnação de resinas nas cavilhas tem, como objetivo, aumentar o desempenho mecânico, melhorar a sua estabilidade dimensional e reduzir a velocidade do processo de degradação. O produto da impregnação resulta em um compósito com melhorias no comportamento estrutural da ligação e no desempenho global da estrutura.

No entanto, a busca por um conector mais resistente à ação das intempéries fomenta a procura por novos materiais mais eficientes quanto ao processo de fabricação, à resistência mecânica e à economia; e que possam cumprir o papel de suportar as solicitações provenientes das ligações entre os elementos estruturais e atender ao desempenho exigido pelas normas técnicas vigentes.

De acordo com Santos (2013), os compósitos de fibras de carbono constituem, atualmente, uma opção atraente para o reforço de estruturas de madeira,

devido, mormente, ao bom desempenho documentado nos estudos de reforço estrutural, à elevada relação resistência/peso dos materiais, à resistência à corrosão, à facilidade e à rapidez de aplicação.

Considerando a importância estrutural das ligações e os parâmetros anunciados acima, este trabalho estuda as ligações em estruturas de madeira, focando a ligação com cavilhas, por meio do desenvolvimento de um conceito de reforço de cavilhas de madeira com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC).

Com isso, pretende-se oferecer à comunidade da Engenharia, da Arquitetura e da Construção um conector mais resistente às ações mecânicas e às intempéries, por meio de uma alternativa de reforço para os elementos conectores, o qual poderá ser aplicado em todos os tipos de madeira, independentemente da sua classe e da sua densidade.

1.1 PROPOSTA DO TRABALHO

1.1.1 Problema de pesquisa

Quais aspectos de inovação tecnológica podem ser aplicados aos conectores de madeira de dicotiledônea para ligações estruturais, a fim de que seu desempenho mecânico seja melhorado?

1.1.2 Hipótese

O compósito formado a partir de cavilhas de madeira reforçadas com tecido de fibra de carbono e de resina epóxi para uso estrutural apresentarão propriedades mecânicas superiores às das cavilhas não reforçadas.

1.1.3 Objetivos

1.1.3.1 *Objetivo geral*

Propor cavilhas de madeira de seções circulares reforçadas com fibra de carbono para ligações estruturais como uma técnica alternativa de reforço, visando ao aumento da resistência mecânica do elemento de conexão.

1.1.3.2 *Objetivos específicos*

O estudo apresenta os seguintes objetivos específicos:

- a) realizar a caracterização físico-mecânica da madeira utilizada na fabricação das cavilhas;
- b) descrever o processo de produção das cavilhas reforçadas, evidenciando seus aspectos limitantes e as potencialidades do conector desenvolvido;
- c) verificar a variação da resistência mecânica das cavilhas de madeira folhosa com reforço de tecido de fibra de carbono e de resina epoxídica;
- d) analisar o comportamento das cavilhas em ligações de peças de madeira solicitadas nas compressões normal e paralela às fibras, por meio de ensaios de resistência mecânica.

1.1.4 Delimitação da pesquisa

Como material de pesquisa, optou-se por propor uma técnica de reforço que utiliza a madeira da classe dicotiledônea, de modo a sugerir uma possibilidade para o emprego de cavilhas feitas com madeiras duras. Isso se fundamenta no fato de que o reforço por meio da impregnação de resinas não é adequado para as madeiras folhosas, devido à menor porosidade que apresentam em comparação às madeiras coníferas. A escolha pela madeira do gênero *Manilkara*, popularmente conhecida como maçaranduba, considerou sua disponibilidade na cidade de Salvador, sendo a madeira mais atrativa entre as madeiras folhosas que se enquadram na classe C60.

Neste estudo, a caracterização mecânica da madeira é feita por meio dos ensaios de compressão paralela às fibras, de compressão normal às fibras, de cisalhamento paralelo às fibras e de flexão estática. Os resultados dos ensaios indicam o desempenho das cavilhas e, também, subsidiam o dimensionamento das ligações cavilhadas.

O tipo de fibra, a matriz empregada, a proporção entre as fases, a orientação das fibras na matriz, as técnicas de produção e o controle de qualidade adotado durante o processo de manufatura das fibras e da resina utilizada no reforço são determinantes para suas propriedades finais. Por meio da aplicação de uma matriz de decisão, foi escolhido um tecido de fibra de carbono 90° trama/urdume

e uma resina do tipo epóxi. A técnica utilizada no processamento do compósito é conhecida como *hand lay-up*, tratando-se da laminação manual.

Pretende-se verificar, então, a influência do reforço com fibra de carbono, com base em uma proposta de variação do número de camadas de PRFC nas cavilhas com até duas camadas de reforço. O incremento no número de camadas de reforço na cavilha está relacionado à melhoria das propriedades de resistência do compósito.

Procura-se utilizar ligações com geometrias condizentes com as boas práticas de projeto (seleção das madeiras, dimensão dos conectores, espaçamentos mínimos) recomendados pela norma vigente NBR 7190 (1997). Os ensaios que investigam o comportamento das cavilhas e das ligações seguiram as linhas de investigação adotadas por outros pesquisadores – as quais serão descritas posteriormente – de forma a analisar a influência do reforço nas cavilhas e a facilitar o estudo do mecanismo de funcionamento.

1.1.5 Justificativa

A corrosão dos conectores metálicos compromete a durabilidade da ligação, influenciando na segurança da estrutura e no desempenho sustentável da construção. Portanto, faz-se necessário adotar materiais que sejam resistentes às diversas condições de exposição e que garantam estabilidade da estrutura durante toda a vida útil da construção. Nesse cenário, a adoção de cavilhas de madeira como conectores nas ligações de estruturas de madeira se torna uma alternativa viável para estruturas sujeitas à alta agressividade ambiental, condição comum às regiões litorâneas, onde é maior o impacto da degradação nos componentes metálicos.

Além de ser uma alternativa para regiões de alta agressividade ambiental, o estudo das ligações cavilhadas reforçadas com fibra de carbono também está relacionado à manutenção de importantes estruturas históricas em que se empregaram cavilhas de madeira, como é o caso das estruturas feitas pela empresa Hauff no Brasil.

O reforço de ligações do tipo cavilha é um tema que tem sido do interesse de diversos pesquisadores. Esse tipo de reforço tem o objetivo de melhorar o desempenho mecânico das ligações do tipo cavilha em estruturas de madeira,

contribuindo para redução do material empregado nas ligações da estrutura. A aplicação do reforço tem foca o aumento da rigidez, da resistência última e da ductilidade das ligações, atenuando os modos frágeis de ruína (CARVALHO, 2017; SANTOS, 2013).

Diversas técnicas de reforço têm sido demonstradas na literatura, sobretudo em ligações para estruturas de madeira, verificando o emprego – cada vez maior – de materiais compósitos e a importância do desenvolvimento de soluções para ligações em estruturas. Contudo, essas novas técnicas de reforço são apresentadas, essencialmente, com base em resultados experimentais que são realizados, em geral, com madeiras de florestas plantadas em países europeus ou norte-americanos. Em consequência disso, os modelos de aplicação que surgem estão distantes das condições e das espécies de madeira presentes no Brasil.

1.1.6 Metodologia da Pesquisa

A pesquisa é realizada em duas etapas: uma parte teórica sobre o tema abordado; e uma parte centrada nos ensaios experimentais.

A parte teórica consiste em uma revisão bibliográfica, com a finalidade de levantar o estado da arte das ligações com cavilhas de madeira e de estudar a aplicação de polímeros reforçados com fibras (PRF) ao reforço estrutural de elementos de madeira. O percurso metodológico adotado para a revisão bibliográfica é a coleta de artigos vinculados ao tema do estudo nas principais bases de dados eletrônicas, como Scopus, Google Scholar e Portal de Periódicos da CAPES. Assim sendo, para a coleta dos dados, foram pesquisados os termos “cavilhas de madeira”, “ligações cavilhadas”, “fibra de carbono”, “*wood dowels*”, “*wood pegs*”, “*carbon fiber reinforced polymer*”.

Na etapa de caráter experimental, foram realizados, na madeira estudada, ensaios de caracterização física (umidade, densidade básica e densidade aparente) e mecânica (compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e flexão). O processo de produção das cavilhas reforçadas foi descrito, evidenciando seus aspectos limitantes e as potencialidades do conector desenvolvido.

Na etapa seguinte do estudo, ocorreram os ensaios experimentais de resistência mecânica das cavilhas submetidas a esforços de flexão. Foram,

também, submetidos ao ensaio de resistência mecânica os protótipos de ligações com cavilhas reforçadas e não reforçadas.

Os modelos de ligação foram caracterizados através de ensaios destrutivos de compressão paralela às fibras e compressão normal às fibras, com intuito de analisar e comparar as características mecânicas das ligações compostas por cavilhas de madeira reforçadas e cavilhas não reforçadas.

1.1.7 Estrutura da Dissertação

O trabalho está dividido em seis capítulos, que compreendem a introdução; a revisão da literatura; os materiais e os métodos utilizados; os resultados preliminares e a discussão; e os resultados esperados.

No primeiro capítulo, consta a introdução do trabalho, apresentando a contextualização do tema; os objetivos da pesquisa e a sua justificativa; uma síntese da metodologia utilizada; a delimitação do tema da pesquisa; e a estrutura da dissertação.

No segundo e no terceiro capítulos, é apresentada a revisão bibliográfica que serviu de apoio ao estudo e à elaboração da técnica de reforço proposta. No segundo capítulo, são abordados os principais tipos de ligações em estruturas de madeira; a degradação dos conectores metálicos; os modelos de cálculo; e o estado da arte das ligações cavilhadas. Por sua vez, o terceiro capítulo trata dos compósitos reforçados com fibras; e contém uma descrição das principais características do processo de reforço com PRFC e de técnicas já propostas por outros trabalhos disponíveis na literatura.

No quarto capítulo, estão os procedimentos adotados na parte experimental da pesquisa. Em seu decorrer, encontram-se os detalhes referentes à execução dos corpos de prova; as características mecânicas e a justificativa da escolha dos materiais utilizados; os procedimentos de execução dos corpos de prova; os registros fotográficos; os procedimentos de ensaios para a determinação do teor de umidade; os procedimentos de ensaio de determinação da caracterização física e mecânica da madeira estudada; e, finalmente, os procedimentos utilizados nos ensaios de resistência mecânica das cavilhas e das ligações cavilhadas.

No quinto capítulo, são apresentadas as discussões e os resultados obtidos nos ensaios experimentais.

Por último, no capítulo sexto, há as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS

Desde os tempos mais remotos, a madeira é utilizada como material de construção de estruturas. Em algum momento, surgiu a necessidade de ligar os diversos elementos de madeira para garantir a estabilidade das construções. Atualmente, as estruturas adquiriram uma grande complexidade, e novas técnicas de ligação foram desenvolvidas, de modo a garantir a adequada transferência de esforços entre os elementos de madeira. Apesar de ter sido desenvolvida uma diversidade de técnicas de ligação, ainda há lacunas na previsão do seu comportamento estrutural.

As ligações entre os elementos estruturais são pontos críticos, uma vez que estão sujeitas a esforços e a tensões localizadas, constituindo zonas propícias a fendilhar. Assim, as ligações exigem uma atenção redobrada, de modo que a resistência e a estabilidade global da estrutura não sejam colocadas em risco.

Os vários tipos de ligações existentes podem ser classificados relativamente a diversos aspectos. Levando em conta a evolução das ligações, Mendes (1994) e Santos (2013) distinguiram as ligações clássicas das ligações modernas, devido ao fato de que as últimas se caracterizam pelo progresso no domínio das ligas metálicas, fazendo com que os conectores metálicos se tornassem mais utilizados. Os autores também classificaram as ligações quanto ao tipo de tecnologia empregada, havendo ligações por entalhe (ligações tradicionais), ligações mecânicas (que recorrem aos elementos conectores para a junção dos elementos) e ligações coladas (por meio do recurso de adesivos estruturais).

De acordo com Santos (2013), a evolução das ligações tradicionais de madeira-madeira para o uso de outros materiais se deveu, principalmente, à necessidade de construir mais rapidamente e de, ao mesmo tempo, garantir uma boa transmissão de esforços e uma melhor estabilidade da ligação.

Atualmente, observa-se um grande interesse no estudo e no desenvolvimento de conectores, com o aparecimento de diferentes técnicas, que vão desde o simples prego até conectores feitos sob medida e diversas soluções que utilizam compósitos reforçados com fibras.

2.1 TIPOS DE LIGAÇÕES

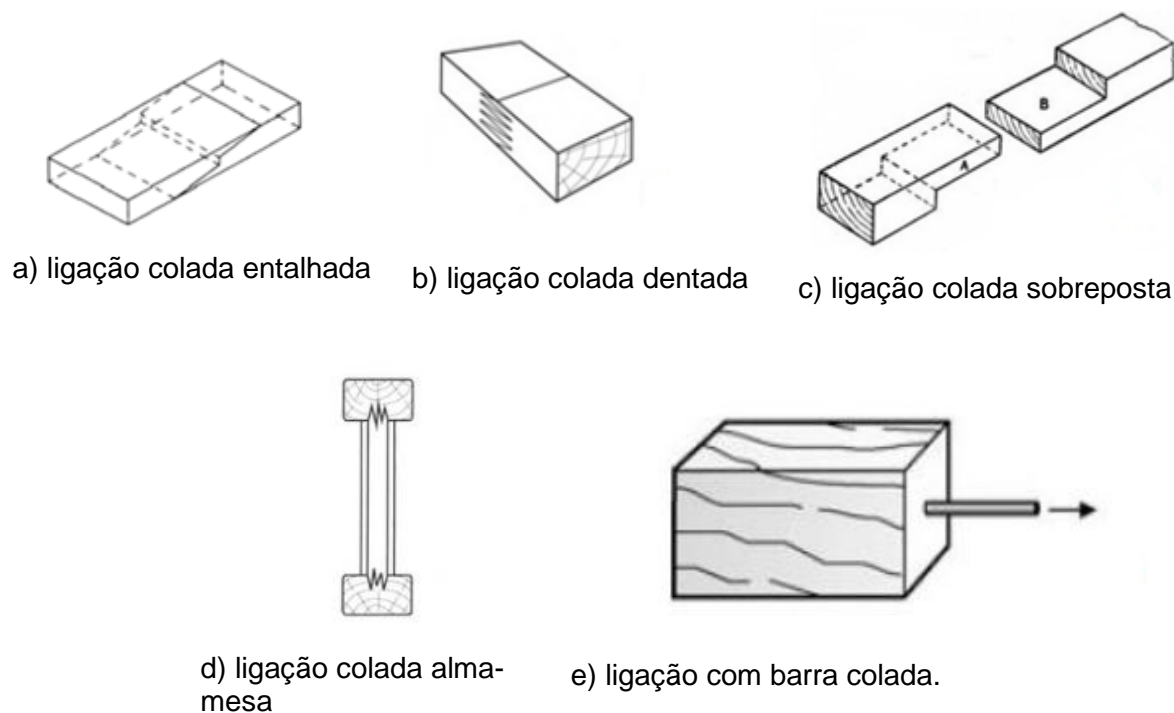
No presente, os principais componentes empregados em ligações de madeira são colas, pregos, grampos, braçadeiras, tarugos, entalhes, parafusos, cavilhas de madeira, pinos e conectores metálicos sob medida.

Os grampos e as braçadeiras são utilizados apenas como elementos auxiliares de montagem, não sendo considerados elementos de ligação estrutural (PFEIL; PFEIL, 2003).

As ligações coladas têm fomentado o mercado de adesivos estruturais, assumindo, hoje, um papel importante no desenvolvimento de novos produtos de madeira. Segundo Santos (2013), esse incremento na utilização das ligações coladas está relacionado às suas vantagens, entre as quais estão uma maior distribuição das tensões por toda a superfície de contato, o que provoca nenhum ou pouco dano nos elementos a ligar; um reduzido acréscimo de carga à estrutura; uma resistência à fadiga superior a qualquer outro tipo de ligação; uma capacidade de ligar diferentes materiais; e o potencial de reduzir os custos de mão de obra. O controle do teor de umidade da madeira e a preparação prévia das superfícies a colar são etapas essenciais para a colagem. Quanto à operação de colagem propriamente dita, é importante controlar a quantidade de cola; a temperatura de colagem; a pressão e o tempo de cura recomendados pelos fabricantes dos adesivos.

Entre as limitações das ligações coladas, incluem-se o fato de serem ligações permanentes e a dificuldade de previsão da sua durabilidade (CUSTÓDIO; BROUGHTON; CRUZ *et al.*, 2009). Outro aspecto limitante da maior utilização das ligações coladas na construção em madeira tem que ver com a questão do dimensionamento. O dimensionamento de ligações coladas não está previsto na atual norma brasileira, a NBR 7190 (ABNT, 1997). Portanto, a análise da resistência da ligação é baseada, essencialmente, em ensaios experimentais. A tecnologia de ligação por colagem tem sido mais usada na produção de elementos de madeira laminada colada (MLC) do que na ligação de elementos estruturais. A sua utilização em nós estruturais deverá, em princípio, ser realizada em conjunto com outros elementos de ligação mecânica. Na Figura 1, são apresentados alguns exemplos de ligações coladas.

Figura 1 – Principais tipos de ligações coladas



Fonte: Elaborada pelo autor com base em Dias (2015).

Nas ligações por entalhe, também conhecidas como ligações tradicionais, uma peça de madeira se une a outra, usualmente, sem elementos auxiliares, mediante encaixes esculpidos no próprio elemento estrutural. Essas ligações têm a desvantagem de reduzir a seção efetiva das peças, induzindo à concentração de tensões na zona do entalhe, região em que a seção líquida da peça é reduzida. Santos (2013) afirma que existem múltiplos tipos de ligações por entalhe, dependendo dos costumes e das tradições de carpintaria das diferentes zonas geográficas. Na Figura 2 estão expostos alguns exemplos de ligações por entalhe.

Figura 2 – Exemplo de ligações por entalhe



a) vista frontal de ligação meia seção



b) encaixe para ligação entre peças ortogonais

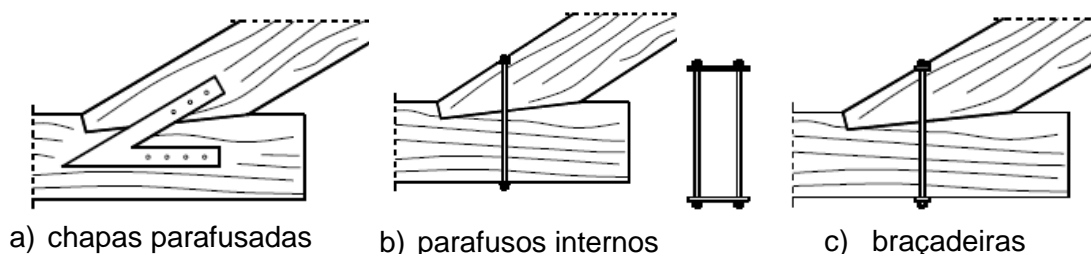


c) encaixe entre peças inclinadas

Fonte: Adaptada de Calil Neto (2014, p. 36).

Os entalhes e os encaixes são ligações em que a madeira trabalha a compressão associada ao corte. Nessas ligações, a madeira realiza, em geral, o principal trabalho de transmissão dos esforços, e outros componentes são utilizados para impedir a separação das peças (PFEIL; PFEIL, 2017). Na Figura 3 estão esquematizados alguns componentes de reforço utilizados em ligações tradicionais do tipo entalhe.

Figura 3 – Componentes utilizados em ligações do tipo entalhe.



Fonte: Branco, Santos e Cruz (2008, p. 6) .

Além de prevenir as deformações no plano ortogonal à estrutura, o uso desses elementos tem o objetivo de garantir a estabilidade da ligação face à inversão do sentido dos esforços. Entre as ligações mecânicas, nota-se que as ligações com pregos, com parafusos, com pinos e com cavilhas têm sido preferencialmente utilizadas, dada as suas fáceis aplicação e produção.

Os pregos são peças metálicas que devem ser cravadas na madeira com impacto. São utilizados em ligações de montagem e em ligações definitivas. São comercializados em uma variada gama de tamanhos, formatos e diâmetros. A forma mais comum é o prego liso, embora se possa encontrar, também, pregos com frisos e de forma helicoidal. Normalmente, apresentam uma seção circular com diâmetros entre 2 mm e 8 mm e um comprimento que varia entre 30 mm e 180 mm. O material usado na fabricação dos pregos é, em geral, o aço, podendo ser do tipo inoxidável. As ligações pregadas são simples de serem executadas e apropriadas para estruturas sujeitas a cargas leves e para elementos de pouca espessura, constituindo uma solução efetiva e relativamente barata. O desempenho dos pregos, tanto à resistência lateral como ao arrancamento, pode ser melhorado pela deformação mecânica do prego liso, por meio de frisos circulares ou helicoidais.

Os parafusos são de dois tipos: parafusos rosqueados autoatarraxantes (Figura 4 a) e parafusos com porcas e com arruelas (Figura 4 b). Os parafusos autoatarraxantes são muito utilizados em marcenaria e para prender acessórios metálicos em postes, em móveis e em estruturas provisórias e dormentes.

Existem vários modelos de parafusos autoatarraxantes, que são diferenciados por seu comprimento, por seu diâmetro, por sua forma de cabeça, entre outras diferenças.

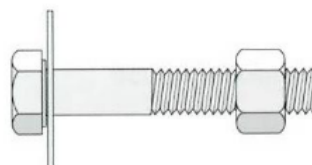
Os parafusos utilizados nas ligações estruturais são cilíndricos e lisos, tendo, em uma extremidade, uma cabeça e, na outra, uma rosca e uma porca. Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), para que as ligações parafusadas sejam consideradas rígidas, a pré-furação deve ser feita com um diâmetro d_0 que não seja maior do que o diâmetro d do parafuso, acrescido de 0,5 mm. Caso sejam empregados diâmetros d_0 maiores, a ligação deve ser considerada deformável.

Figura 4 – Principais tipos de parafusos.

a) auto-atarraxante



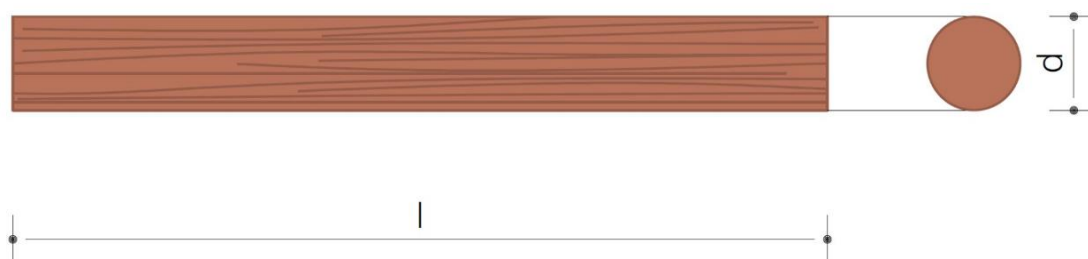
b) parafuso com porca e arruela.



Fonte: Adaptada de Hilário (2013, p. 27).

Os pinos são eixos cilíndricos ou de aço ou de madeira (cavilhas). São colocados em furos feitos à máquina cujo diâmetro deve ser igual ou ligeiramente inferior ao seu. Os pinos são, assim, instalados sem folga, de modo a entrarem em carga sem haver deformação relativa das peças ligadas. De acordo com Santos (2013), a principal diferença entre os pinos e os parafusos de porca reside no fato de estes últimos entrarem folgados no orifício aberto previamente, enquanto os pinos são introduzidos sob pressão, de forma a ficarem justos. Portanto, nos parafusos de porca, a força de aperto entre os elementos ligados é conferida pela compressão transversal nas faces exteriores, por ação das anilhas, ao passo que, nas cavilhas, essa força de aperto é transmitida ao longo da cavilha. Na Figura 5, pode-se observar o perfil de uma cavilha com suas dimensões principais (l = comprimento; d = diâmetro).

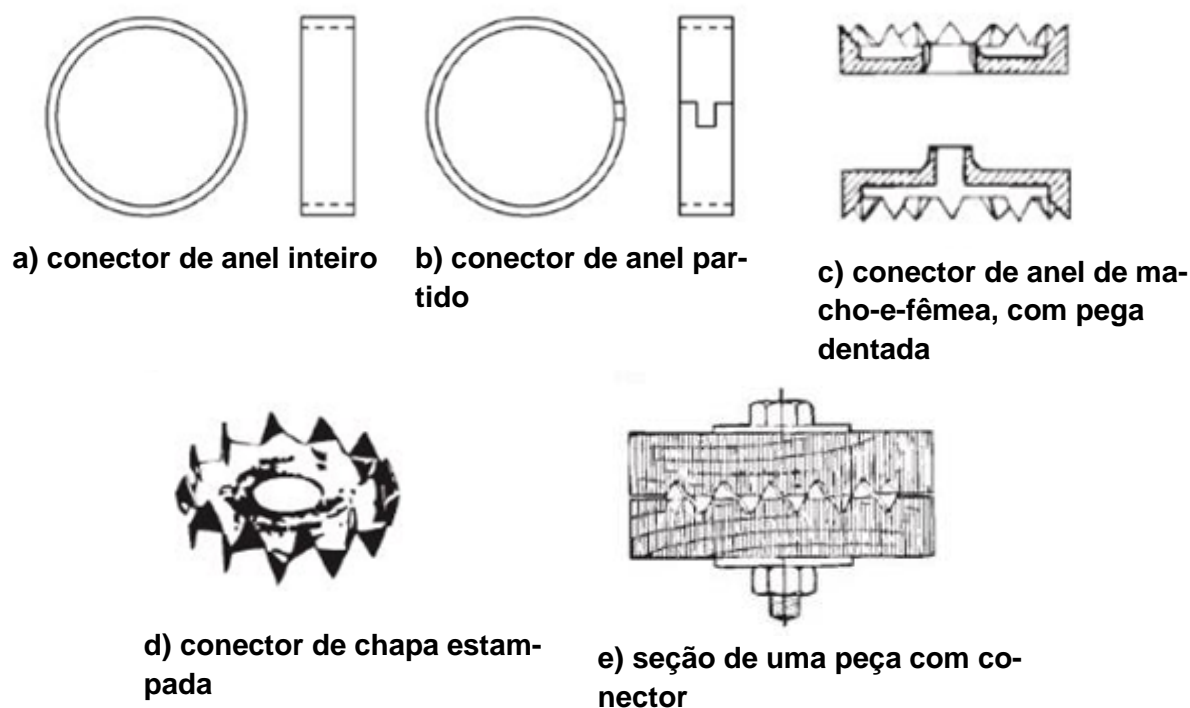
Figura 5 – Cavilhas e suas principais dimensões



Fonte: Elaborada pelo autor.

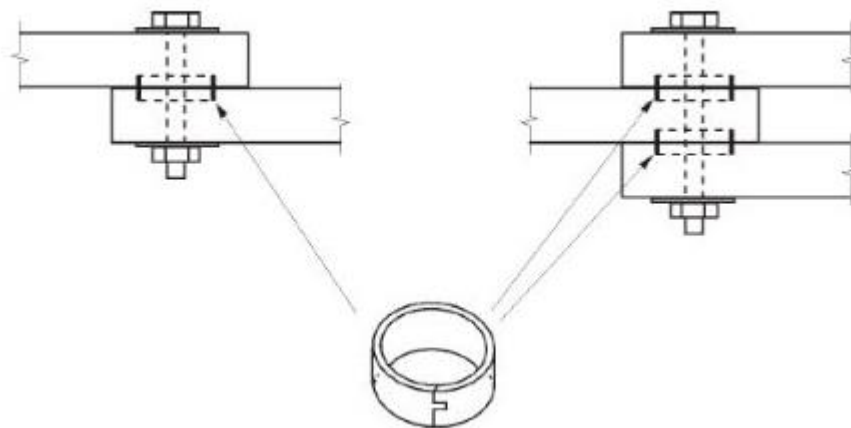
Nas ligações mecânicas de superfície, são utilizadas placas circulares denteadas e anéis metálicos (Figura 6). Os conectores de anel são peças metálicas especiais, encaixadas em ranhuras da superfície da madeira; e apresentam grande eficiência na transmissão de esforços. No local de cada conector, geralmente, coloca-se um parafuso, para impedir a separação das peças ligadas (Figura 7).

Figura 6 – Conectores do tipo anel empregados em estruturas de madeira



Fonte: Pfeil e Pfeil (2017, p. 69).

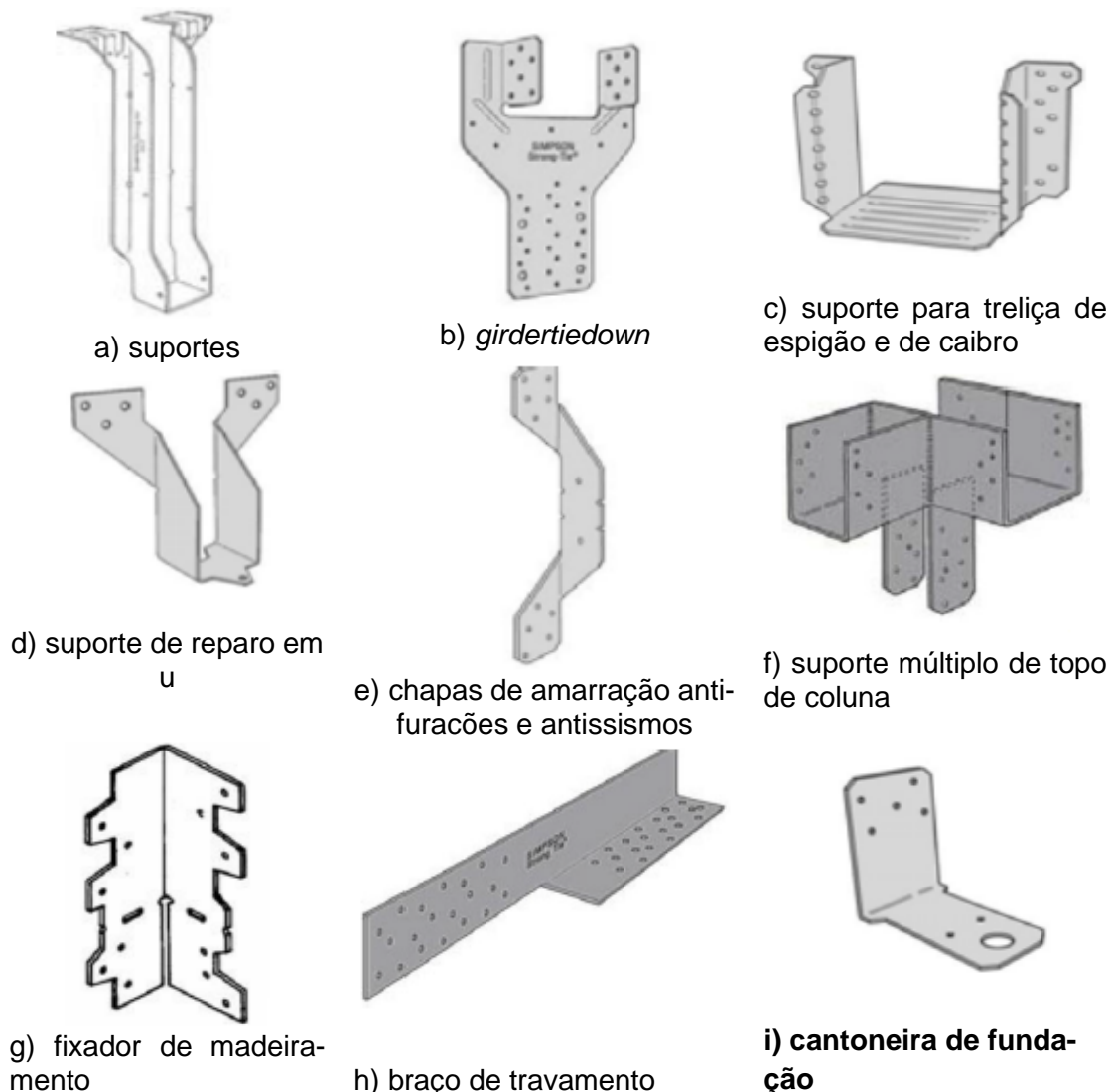
Figura 7– Exemplo de disposição do conector do tipo anel em uma ligação



Fonte: Pfeil e Pfeil (2017, p. 69).

Ainda sobre as ligações mecânicas, vale ressaltar a utilização de chapas e de conectores de aço feitos sob medida para atender aos mais diversos fins e técnicas. O surgimento de chapas de uso estrutural e de conectores sob medida ocorreu com os objetivos de garantir conexões melhores e de gerar agilidade na montagem das estruturas, por da técnica conhecida como *wood frame*. Na Figura 8 podem ser observadas as principais chapas de uso estrutural utilizadas em ligações de estruturas de madeira.

Figura 8 – Chapas de aço conformadas para ligações em estruturas de madeira



Fonte: Adaptado de Moraes, Espíndola e Barichello (2008).

Em suma, em grande parte das ligações, a simples justaposição de dois elementos de madeira obriga a utilização de um terceiro elemento que permita assegurar a ligação propriamente dita. Esse terceiro elemento é determinante para a transmissão dos esforços e, ao mesmo tempo, para garantir a estabilidade da ligação. Com essa importância, é natural o crescente interesse pelo estudo e pelo desenvolvimento dos conectores. Além de conhecer as propriedades dos materiais componentes do conector, é necessário saber, também, as condições

ambientais do local em que será empregado, para que se possa recomendar a melhor solução.

Os aspectos de inovação tecnológica na área de ligações para estruturas de madeira são voltados, sobretudo, para o desenvolvimento, para o melhoramento e para a adição de componentes metálicos. No entanto, a maioria dos conectores metálicos são instáveis termodinamicamente. Quando são embutidos na madeira, os elementos metálicos se sujeitam à corrosão, devido à presença de água e de oxigênio na estrutura celular da madeira; e às reações químicas entre seus constituintes. (NAPPI, 2012). Água em excesso pode afetar a acidez da madeira, a partir da quebra da celulose e de sua transformação em ácido acético (GIOVANELLA, 2009).

Nesse sentido, diversos autores têm conduzido o desenvolvimento de ligações não metálicas e de reforço estrutural para ligações de madeira, principalmente de ligações de polímeros reforçado com fibras, dispensando a utilização de componentes metálicos (Figura 9). No reforço proposto por Santos *et al.* (2010), a técnica baseada na colagem de laminado de fibra de carbono nas peças de madeira demonstrou ser mais eficiente do que a utilização de insertos metálicos.

Figura 9 – Corpos de prova reforçados com PRF.



a) Reforços com PRF: (superior) reforço em espiral feito com fibras de vidro e aramida; (inferior) reforço exterior transversal feito de fibras de carbono.



b) Corpo de prova reforçado com tecido de fibra de carbono submetido à tração.



c) Corpo de prova de ligação reforçado com laminados de fibra de carbono.

Fonte: a) Haller *et al.* (2006, p. 280); b) Mohamad, Accordi e Roca (2011, p. 635); c) Santos *et al.* (2010, p. 5).

Outra desvantagem associada à utilização dos elementos metálicos é o aumento da condução de calor para o interior da madeira, comprometendo a sua resistência ao fogo. Além disso, os componentes metálicos também limitam a utilização dessas ligações ou em ambientes quimicamente mais agressivos ou em presença de materiais com propriedades não magnéticas ou não condutoras. (PALMA *et al.*, 2014).

2.2 DEGRADAÇÃO DOS CONECTORES METÁLICOS

O produto da corrosão do metal tende a acelerar a degradação da madeira na qual está embutido. Simultaneamente, a decomposição da madeira enfraquece, de maneira significativa, o poder de fixação do elemento metálico, levando a falhas de serviço da estrutura (ZELINKA; RAMMER, 2005; NAPPI, 2012).

Zelinka (2005) ressalta que produtos de tratamentos preservativos da madeira podem, ainda, o processo de corrosão do metal. A Figura 10 ilustra patologias provenientes da corrosão dos conectores metálicos.

Figura 10 – Degradação de conectores metálicos e formação de manifestações patológicas na madeira



a) degradação de conectores metálicos e formação de fissura em ligação estrutural de madeira



b) manchas na madeira por corrosão

Fonte: a) Elaborada pelo autor; b) Shupe *et al.* (2008, p. 9).

Outros fatores – como a água de precipitação e de condensação na superfície; os ciclos curtos de umidificação e de secagem; a expansão e a retração –

tendem a gerar fissuras, que permitirão o ingresso de umidade na madeira (NAPPI, 2012).

A deterioração provoca alterações prejudiciais indesejáveis no material (desgaste, variações químicas e modificações estruturais). Isso pode conduzir toda a estrutura à falha. Os problemas ocasionados pela corrosão tornam o material impróprio para a sua utilização e podem causar perdas sociais e econômicas.

Além da deterioração que é ocasionada por corrosão da madeira, condições de teor de umidade elevado associadas a esse dano podem favorecer o aparecimento de fungos apodrecedores (BRITO; CALIL JÚNIOR; SAAD, 2014).

À medida que a corrosão progride, a toxicidade dos íons metálicos e o baixo pH na madeira, eventualmente, eliminam o ataque por fungos, embora o apodrecimento possa continuar a uma certa distância da região afetada. O efeito da corrosão do metal pode ser limitado com a substituição por conectores galvanizados ou não ferrosos (CALIL JR *et al.*, 2006).

Enquanto processo destrutivo, a corrosão causa danos a diversos setores da atividade humana, incluindo danos irreversíveis ao meio ambiente e ao homem. A degradação dos conectores metálicos pela corrosão é um problema de real importância, com implicações que podem colocar em risco a estabilidade global da estrutura.

2.3 MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES CAVILHADAS

O problema da determinação da capacidade resistente e da deformação de uma ligação do tipo cavilha é complexo, sobretudo devido à diversidade de fatores que influenciam em sua resistência. Mendes (1994) listou, entre esses fatores, as densidades específicas dos elementos de madeira (uma vez que uma maior densidade corresponda a uma capacidade resistente superior); o ângulo da direção das fibras da madeira com a direção do esforço atuante; a orientação dos anéis de crescimento nos elementos de madeira; a umidade dos elementos de madeira antes e depois de entrar em serviço; o material e a geometria do conector; a geometria dos elementos de madeira da ligação; as disposições dos elementos de madeira (número de planos de corte); a quantidade e a disposição

dos conectores; as disposições construtivas; o processo de execução da ligação; e o tipo de carga (duração e intensidade).

Diversos autores desenvolveram estudos à procura de modelos de cálculo que permitissem explicar o fenómeno de uma forma confiável. Os estudos realizados podem ser classificados em duas vertentes fundamentais: modelos analíticos e modelos empíricos.

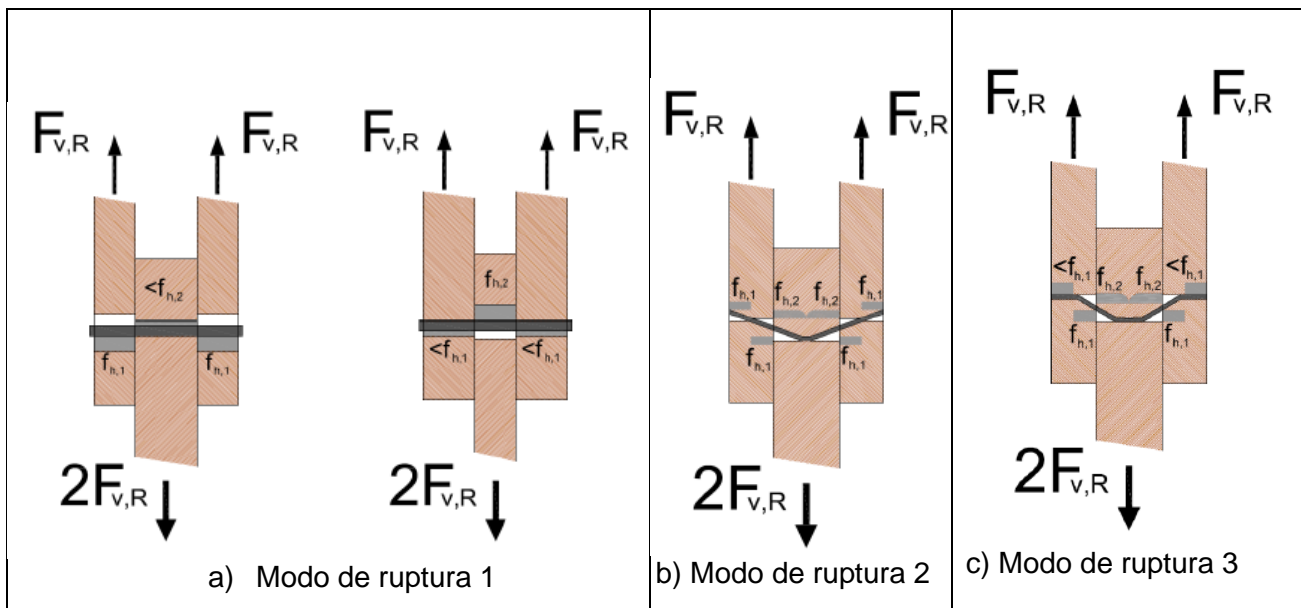
Segundo Mendes (1994), o uso de características dos elementos conectores e de madeira que tenham sido determinadas experimentalmente para aplicação em modelos matemáticos que descrevem a resistência e a deformação de uma ligação constituem os chamados modelos analíticos. Por outro lado, a designação de modelos empíricos é aplicada a modelos resultantes de ensaios aos quais se adaptou uma expressão matemática que relaciona duas ou mais variáveis (por exemplo, força e deslocamento).

Os modelos analíticos podem, por sua vez, subdividir-se em duas classes: modelos de ruptura e modelos força-deslocamento. Os modelos de ruptura são compostos de formulações puramente matemáticas, recorrendo a teorias da mecânica, validadas por ensaios, e a parâmetros obtidos por experimentação.

No passado, o dimensionamento das ligações com pinos se baseava em fórmulas empíricas para a resistência, reproduzindo cargas de ruptura obtidas em ensaios de laboratório para um conector em determinadas configurações de ligação (MILCH *et al.*, 2016; PFEIL; PFEIL, 2003). Atualmente, utiliza-se uma abordagem analítica desenvolvida por Johansen na década de 40 (Johansen, 1949) e, posteriormente, adotada pelas normas técnicas em diferentes países do mundo.

Utilizando a teoria conhecida como de análise limite, os vários mecanismos de plastificação (Figura 11) foram analisados, admitindo comportamento rígido-plástico dos materiais (madeira e aço do pino), o que resulta em expressões para cálculo da carga última da ligação.

Figura 11 – Mecanismos de plastificação em ligações madeira-madeira em corte duplo



Fonte: Adaptada de Almeida (2012).

O modo de ruptura 1 está associado ao esmagamento uniforme das fibras da madeira, do elemento central ou dos elementos laterais. No modo de ruptura 2, além do esmagamento da madeira, ocorrerá a formação de dois pontos de dobramentos, que se localizam, simetricamente, em relação ao plano médio dos elementos. Os dois pontos poderão convergir em um único ponto central. A formação dos pontos de dobramento das fibras ocasiona a rotação do conector, que, por sua vez, potencializa a deformação dos elementos. O modo de ruptura 3 é consequência da formação de quatro pontos de dobramento das fibras, simétricos, dois a dois, em relação ao plano médio. Mais uma vez, os dois pontos que se localizam na parte central podem convergir em um, caso em que se poderá verificar a deformação dos elementos de madeira que participam na ligação, por força das ações de cisalhamento e de compressão normal às fibras do conector. Vê-se, então, que a ruptura de uma ligação do tipo cavilhada, quando está em corte duplo, pode acontecer, segundo Johansen, de quatro formas diferentes, correspondendo, cada uma, a um estado de tensão e de deformação característico.

De acordo com Milch *et al.* (2016), o comportamento mecânico das cavilhas de madeira ainda não é precisamente conhecido, e as informações sobre rigidez e sobre capacidade de carga são bastante escassas.

Alternativas numéricas e analíticas ao modelo de Johansen, também conhecido como *European Yield Model* (Modelo Europeu de Cedência), têm sido propostas, visando a uma melhor descrição do comportamento mecânico das ligações do tipo cavilha. No entanto, o modelo proposto por Johansen ainda é adotado pelas principais normas tocantes ao assunto, como as normas americana, NDS, e europeia, Eurocode 5.

De acordo com Oliveira e Dias (2005), as equações de Johansen são, geralmente, aplicáveis a qualquer combinação de materiais derivados da madeira, desde que suas propriedades sejam conhecidas. Segundo o autor, deve-se a essa fácil aplicação a novos materiais o fato de a formulação de Johansen ter sido adotada para o dimensionamento de ligações nas principais normas de estruturas de madeira.

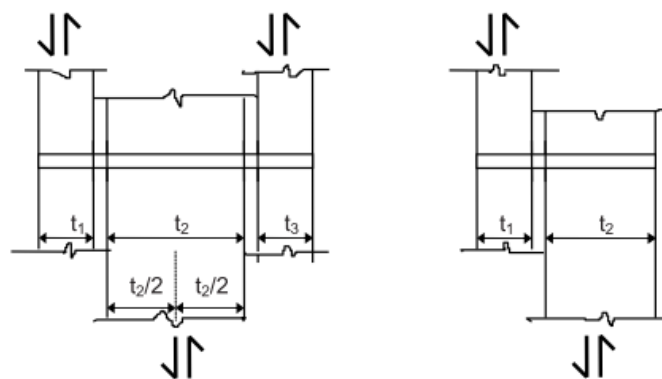
O projeto de ligações com pinos metálicos e com cavilhas segue os procedimentos impostos pela NBR 7190 (ABNT, 1997). Os modelos de ruptura adotados, nessa norma, em ligações de peças de madeira são determinados pelas equações propostas por Johansen (1949). A norma de projeto está em processo de alteração, no sentido de tornar mais eficaz o projeto de ligações e, conseqüentemente, de aumentar a eficiência das estruturas de madeira.

2.3.1 Parâmetros de dimensionamento de ligações cavilhadas.

2.3.1.1 Norma vigente – ABNT NBR 7190/97

Segundo a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), as ligações por corte são aquelas em que a força a ser transmitida de uma peça à outra é perpendicular ao eixo do elemento de ligação. Os pinos, os pregos e os parafusos, em ligações por corte, podem estar sujeitos a uma (Figura 12 a), a duas (Figura 12 b) e, ainda, a múltiplas seções de corte.

Figura 12 – Ligações com cavilhas



a) corte duplo

b) corte simples

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Gomes (1997, p. 52).

As ligações por corte executadas com pregos, com parafusos, com pinos metálicos ou com cavilhas de madeira se comportam de maneira semelhante. Por isso, estão englobadas na categoria de ligações com pinos. Segundo a NBR 7190 (1997), a resistência total de uma ligação por pinos é dada pela soma das resistências correspondentes às suas diferentes seções de corte.

No caso dos conectores de madeira – cavilhas de madeira –, o valor de cálculo da resistência de um pino ($R_{vd,1}$) correspondente a uma dada seção de corte entre duas peças de madeira é determinado em função da resistência à compressão paralela ($f_{c0,d}$) da cavilha, considerada em sua flexão; e da resistência à compressão normal ($f_{c90,d}$) da cavilha, considerada quanto à segurança relativa a seu esmagamento; do diâmetro (d) da cavilha; e da espessura (t), tomada como a menor das espessuras de penetração entre os elementos interligados.

No caso de cavilhas em corte duplo, aplicam-se os mesmos critérios para a determinação da resistência correspondente a cada uma das seções de corte, considerando-se o valor de t – que será empregado, na equação (1), para cálculo do parâmetro beta – como o menor dos valores entre t_1 e $t_2/2$, em uma das seções, e entre t_2 e t_3 , na outra. O valor de “ d ” representa o diâmetro da cavilha que será utilizada.

O parâmetro beta será comparado ao valor do parâmetro beta limite, que será calculado por meio da equação (2).

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (1)$$

$$\beta_{lim} = \sqrt{\frac{f_{c0d,cav}}{f_{c90d,cav}}} \quad (2)$$

$f_{c0d,cav}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela, e $f_{c90d,cav}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão normal da madeira de que é feita a cavilha. As situações de esmagamento (condição (3)) e de flexão da cavilha (condição (5)) podem ser ponderadas. Semelhantemente, a resistência para situação de esmagamento (expressão 4) e a resistência para situação de flexão na cavilha (expressão 6) podem ser calculadas.

I. Esmagamento da caviha

$$\text{para } \beta \leq \beta_{lim} \quad (3)$$

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{c90d,cav} \quad (4)$$

II. Flexão do pino

$$\text{para } \beta > \beta_{lim} \quad (5)$$

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{c0d,cav} \quad (6)$$

A NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta expressões para o cálculo da resistência de ligações com cavilhas análogas às de ligações com parafusos e com pregos. No entanto, o parâmetro beta limite, para conectores metálicos, é calculado por meio dos valores de resistência ao escoamento do pino metálico (f_{yd}) e de resistência ao embutimento da madeira (f_{ed}).

Quando a resistência ao embutimento da madeira não for calculada de forma experimental, a norma brasileira permite que a resistência ao embutimento seja aferida de maneira alternativa, como indicam as expressões (7) e (8).

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} \quad (7)$$

$$f_{e90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_e \quad (8)$$

$f_{e0,d}$ equivale à resistência ao embutimento paralelo às fibras; por sua vez, $f_{e90,d}$, à resistência ao embutimento normal às fibras da madeira; e, por fim, $f_{c0,d}$, à resistência à compressão paralela às fibras. O parâmetro α_e é calculado com auxílio da Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficiente α_e para cálculo da resistência ao embutimento normal às fibras, sendo do diâmetro do pino

d(cm)	≤0,62	0,95	1,25	1,6	1,9	2,2	2,5	3,1	3,8	4,4	5,0	≥ 7,5
α_e	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,10	1,07	1,00

Fonte: ABNT (1997, p. 21).

Nas equações referentes à resistência do pino, o parâmetro beta também será comparado ao valor do parâmetro beta limite. Considerando a hipótese de embutimento da madeira, substitui-se a resistência à compressão normal às fibras pela resistência ao embutimento da madeira (equação (7)). Na hipótese de flexão do pino, substitui-se a resistência à compressão paralela às fibras pela resistência ao escoamento do pino (equação (9)).

I. Embutimento na madeira

$$\text{para } \beta \leq \beta_{lim} \quad (9)$$

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} \quad (7)$$

II. Flexão do pino

$$\text{para } \beta > \beta_{lim} \quad (8)$$

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd} \quad (9)$$

Para se obter a carga máxima resistente da ligação, multiplicam-se os valores de $R_{vd,1}$ pelo número de planos de corte e pelo número de conectores na ligação.

Neste trabalho, todo o programa experimental e numérico envolve ligações por pinos, focando as ligações com cavilhas de madeira. As disposições construtivas utilizadas na elaboração dos corpos de prova e na determinação dos espaçamentos necessários seguem a atual norma brasileira, a NBR 7190 (ABNT, 1997).

2.3.1.2 Proposta de revisão da NBR 7190 e Eurocode 5

Pela norma europeia de estruturas de madeira Eurocode 5 (CEN, 2004), em seu item 8.2.2, a resistência característica de um elemento de ligação para cortes duplos deve ser determinada por meio do menor valor obtido das expressões associadas aos modos de falhas estabelecidos pela teoria de Johansen (1949) – que são a base do European Yield Model (EYM) e foram incorporados à norma de Estruturas de Madeira Europeia EN 1995-1-1 – Eurocode 5 (CEN, 2004). A atual revisão da norma brasileira de estruturas de madeira passará a adotar os mesmos critérios da norma europeia.

Esses modelos de falhas dependem de duas propriedades mecânicas da madeira: resistência ao embutimento da madeira que está sendo conectada; e resistência à flexão da madeira da cavilha que faz a conexão. Assumindo a

hipótese de que o material tem um comportamento rígido-plástico (sem deformação elástica e com deformação plástica perfeita), como foi apresentado na Figura 11, Johansen diferenciou os modos de falhas das ligações simples dos das duplas. Os modos de falhas apresentados correspondem os seguintes efeitos:

- a) embutimento na madeira das peças externas;
- b) embutimento na madeira da peça interna;
- c) flexão do pino;
- d) flexão do pino e embutimento na madeira.

Para cada modelo de falha, foi deduzida uma equação, de forma que a força característica é representada pelo menor valor dentre os presentes na equação (10).

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} a) f_{e1,k} t_1 d \\ b) 0,5 f_{e1,k} t_2 d \beta \\ c) 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ d) 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (10)$$

- Fator $\beta = f_{e2,k} * f_{e1,k}$ (produto das resistências de embutimento para as peças a serem ligadas)
- t_1 = espessura da peça 1 (externa)
- t_2 = espessura da peça 2 (central)
- f_e = resistência ao embutimento
- d = diâmetro do pino
- $M_{y,k}$ = momento aplicado pela força F

O Eurocode 5 e o projeto de revisão da norma brasileira salientam que o valor $F_{ax,Rk}/4$ é a contribuição do efeito de confinamento provocado ou pela

compressão das arruelas nas laterais externas da ligação; ou pela resistência ao arrancamento, no caso de pregos e de parafusos de rosca soberba; ou pelo embutimento da cabeça do prego ou do parafuso de rosca soberba na lateral externa da peça de madeira. A contribuição do efeito de confinamento deve ser limitada às seguintes porcentagens das parcelas das equações que representam os modos de falha c e d, desconsiderando o fator de atrito: pregos cilíndricos lisos, 15%); pregos anelados, 25%; parafusos passantes com porca e arruelas, 25%; parafusos de rosca soberba, 100%; pinos metálicos ajustados, 0%. Apesar de não haver menção às cavilhas de madeira, considera-se ser o mesmo caso do pino metálico ajustado.

O momento resistente característico do pino metálico $M_{y,k}$ em N·mm deve ser determinado pela equação (11).

$$M_{y,k} = 0,3 * f_{uk} * d^{2,6} \quad (11)$$

f_{uk} é a resistência última característica da tração do aço do pino metálico, dada pelas normas ABNT NBR ISO898-1, ASTM A-307, ASTM A-325, ASTM A-490 e NBR 5589 (em MPa). d é o diâmetro efetivo do pino metálico (em mm), dado pela norma ABNT NBR 8800.

Em ambos os documentos – o projeto de revisão da atual ABNT NBR 7190 e o Eurocode 5 –, não há diretrizes ou fórmulas empíricas que possam determinar o cálculo do momento resistente característico para pinos de madeira. Neste trabalho, para o cálculo do momento resistente das cavilhas de madeira, foi utilizada a equação 15.

$$M_{y,k} = \frac{f_{m,k} * \pi * d^3}{32} \quad (15)$$

$f_{m,k}$ é a resistência da cavilha à flexão, e d é o diâmetro da cavilha.

A equação coincide com o momento resistente para um elemento circular submetido à flexão, hipótese considerada por Johansen no cálculo desse tipo de ligação. O método não leva em conta a classe, a densidade ou o teor de umidade

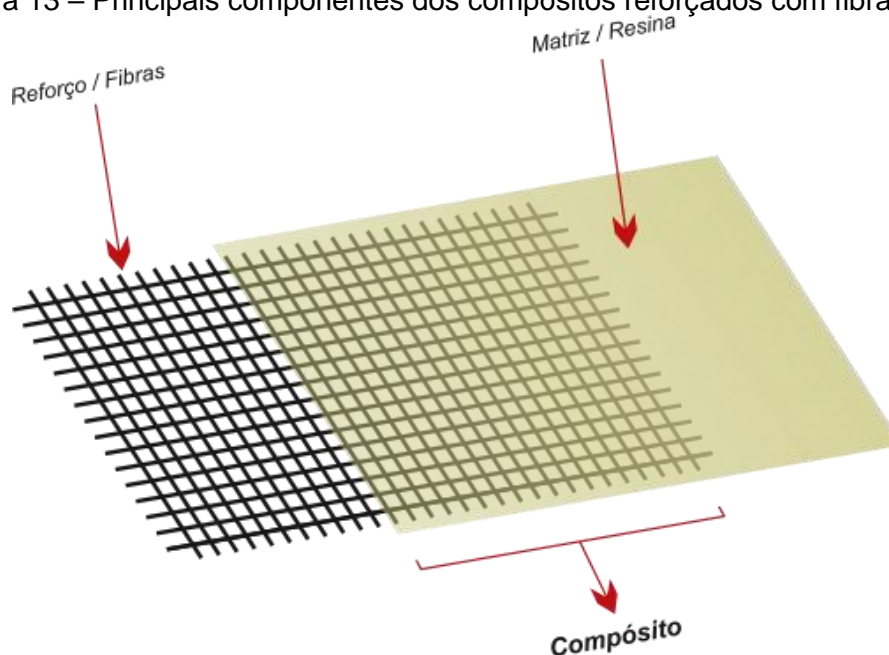
da madeira. A equação foi, também, aplicada por Branco; Teodorescu e Pereira (2011), sendo esse o único método encontrado para a determinação do momento resistente da cavilha.

3 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)

O estudo das ciências dos materiais tem evoluído com a criação de novos materiais específicos para a engenharia. Na última década, houve grande procura por materiais muito resistentes, duráveis, pouco deformáveis e capazes de absorver e de dissipar energia, sem ocorrência de ruptura frágil e sem patamar de escoamento (JUVANDES, 2011).

A combinação adequada de, no mínimo, dois componentes – elemento de reforço e matriz, unidos por uma interface, diferindo em forma e/ou em composição – dá origem aos materiais chamados compósitos, cujas propriedades são superiores às dos componentes individuais (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012; SHACKELFORD, 2009). Na Figura 13, é possível identificar os principais componentes da formação de um material compósito.

Figura 13 – Principais componentes dos compósitos reforçados com fibras



Fonte: Oxyblack (2019).

Os materiais compósitos são formados por reforços de fibras ou de partículas aglomerados por uma matriz, que pode ser metálica, cerâmica ou polimérica (SHACKELFORD, 2009).

Nesta pesquisa, os materiais estudados são da classe dos compósitos poliméricos. Os componentes principais desse tipo de compósito são a matriz

polimérica e o reforço. As matrizes poliméricas podem ser termorrígidas ou termoplásticas e são responsáveis pela transferência dos esforços, pelo alinhamento das fibras e pela proteção das fibras da abrasão e da degradação ambiental. A matriz está diretamente relacionada às resistências à compressão e ao cisalhamento do compósito. Esse componente confere, ainda, rigidez ao material, tornando-o suscetível a danos (MASTBERGEN, 2004).

O componente reforço pode ser constituído ou por partículas ou por fibras (picadas ou contínuas). Neste estudo, são utilizadas fibras contínuas. Esse componente é, prioritariamente, responsável pela resistência mecânica aos esforços, sobretudo aos de tração e aos de fadiga.

A área de materiais compósitos tem mostrado um desenvolvimento contínuo, motivado pela sua crescente aplicação a setores que exigem produtos com elevados valores de resistência e com menor massa específica – em relação aos metais.

De acordo com Beber (2003), a evolução na tecnologia de novos materiais tornou possível substituir as clássicas chapas de aço para reforço de estruturas de concreto por materiais de melhor desempenho. Isso conduziu à ideia de se utilizar mantas, tecidos ou laminados de fibras unidirecionais e contínuas em matrizes de resina epóxi. Segundo Prado (2016), a resistência e a rigidez dos compósitos de fibras reforçadas com polímeros (FRP) depende, basicamente, do tipo de fibra (material, gramatura, direção das fibras etc.), da matriz polimérica e da interface entre ambas.

A seleção entre as várias opções de materiais, tanto para a matriz polimérica quanto para o reforço, está condicionada a fatores como desempenho, custo, condições de processamento e disponibilidade (NOGUEIRA *et al.*, 1999). Uma característica de suma importância do tipo de material é a razão resistência/peso, em que os reforços de fibras de carbono têm se sobressaído. A fibra de carbono, por exemplo, apresenta uma razão resistência/peso de quatro a cinco vezes maior do que a do alumínio (MASTBERGEN, 2004; SHACKELFORD, 2009).

O compósito obtido por meio da combinação do reforço contínuo com a matriz polimérica apresenta baixos valores de massa específica e elevados valores de resistência mecânica e de rigidez. Nesse sentido, este capítulo

apresenta conceitos básicos relativos aos dois componentes do material compósito – matriz e reforço – e ao processamento desse material, de modo a embasar, conceitualmente, o tema abordado no trabalho.

3.1 MATRIZ DE UM COMPÓSITO

A matriz é o componente do compósito responsável pela aparência do produto, por suas características externas. Tem, também, por função, envolver e proteger o reforço de ataques externos, como, por exemplo, abrasão mecânica e reações com substâncias químicas do ambiente. Os efeitos externos podem introduzir defeitos superficiais capazes de formar trincas, as quais podem conduzir a falhas em baixos níveis de tensão. Além disso, a matriz transmite as tensões aplicadas ao compósito para o reforço. Quanto ao tipo de matrizes utilizadas, os compósitos podem ser classificados em de matriz polimérica, de matriz metálica e de matriz cerâmica (PINA, 2004).

De acordo com Pina (2004), as matrizes poliméricas mais frequentemente empregadas são as resinas termorrígidas e termoplásticas. Entre as primeiras, as mais utilizadas são os poliésteres insaturados, as resinas epoxídicas, amínicas, fenólicas e poliamidas. Dentre os termoplásticos, os mais utilizados no Brasil são o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS), o policloreto de vinila (PVC) e o politereftalato de etileno (PET).

Ainda, segundo a autora, a grande vantagem dos polímeros termofixos está nas suas elevadas propriedades mecânicas, que se mantêm, até mesmo, em temperaturas em que um termoplástico teria se desfeito.

As principais matrizes poliméricas são formadas por resinas. A escolha do tipo de resina deve estar de acordo com a sua aplicação. Essas resinas são, particularmente, adequadas ao uso como materiais para a fabricação de compósitos, por sua facilidade de manuseio na fabricação de compósitos e por sua adesão à superfície da fibra (GAMA, 2017).

As resinas epóxi foram introduzidas no mercado após a Segunda Grande Guerra e podem ser consideradas um avanço tecnológico em relação a alguns termorrígidos existentes, como, por exemplo, as resinas fenólicas e poliéster (COSTA, 1998).

3.1.1 Cura da resina epóxi

As resinas epóxi são convertidas em polímeros termorrígidos por um processo chamado reação de cura, pela ação de agentes de cura, que, também, são conhecidos por endurecedores. O termo cura é usado para descrever o processo em que um ou mais tipos de reagentes – isto é, um grupo epóxi – e um agente de cura são transformados de um material de baixa massa molar em uma rede rica em ligações cruzadas de maior massa molar (SHACKELFORD, 2009). O mecanismo de crescimento das cadeias moleculares se deve à presença de monômeros polifuncionais. Após essa etapa de tratamento térmico, a resina termorrígida não mais se funde.

A reação química de cura é acelerada com o aumento da temperatura e é irreversível – ou seja, a polimerização se mantém após o resfriamento. A rigidez e a maior estabilidade térmica apresentadas pelos polímeros termorrígidos (em particular, pelas resinas epóxi) as tornam atrativas para aplicações estruturais (ANCELOTTI JR, 2006). Os termorrígidos são conhecidos, ao mesmo tempo, como polímeros de engenharia e são muito comuns na substituição de determinados materiais metálicos (SHACKELFORD, 2009).

A utilização de agentes de cura ou endurecedores no processamento de resinas epóxi a transforma em uma estrutura com um arranjo tridimensional das cadeias, conferindo-lhe propriedades como estabilidade, insolubilidade e infusibilidade (BARROS, 2009). De acordo com o autor, a escolha do tipo e da proporção de endurecedor está ligada aos parâmetros de processamento do produto, que, por sua vez, está relacionada ao tempo de trabalho da matriz.

A cura de um polímero termorrígido envolve, usualmente, complexas mudanças químicas que afetam o comportamento reológico do material, quando o monômero ou oligômero passa do estado líquido para o estado sólido. Essa etapa contém a formação de uma estrutura molecular de rede com ligações cruzadas, resultantes de reações químicas dos grupos reativos no sistema (SHACKELFORD, 2009). Nesse processo, a transição entre os dois estados da matéria mencionados exhibe uma região denominada região de gel, em que há uma rede tridimensional de numerosas cadeias livres. Após essa região, a rede se densifica. O tempo que a matéria permanece nessa região é conhecido, igualmente, como *gel time*. Teoricamente, a região de gel corresponde ao limiar de

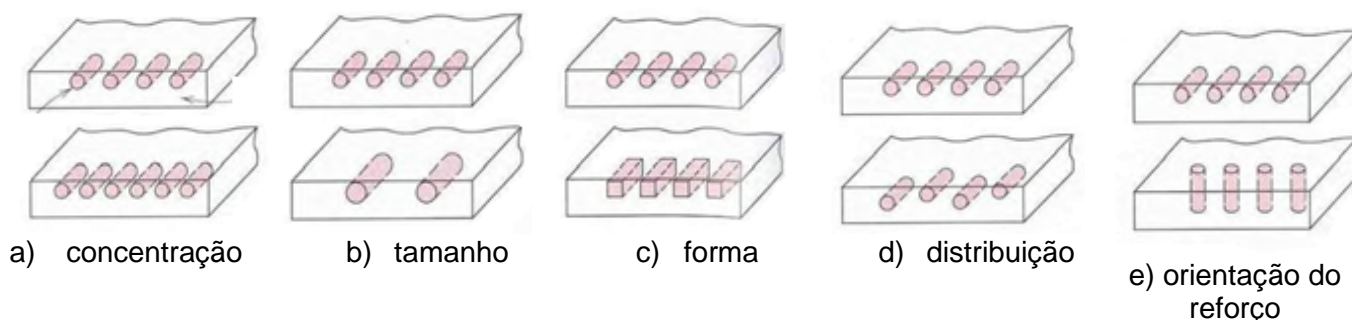
formação de uma molécula, equivalente à formação de uma fração de massa molar insolúvel em solventes polares e apolares (COSTA, 1998).

3.2 REFORÇO COM FIBRAS

As propriedades estruturais de um compósito dependem, primeiramente, do tipo de reforço utilizado, da sua porcentagem em volume no material, da orientação da fibra e o quão efetivo é o material é utilizado (SHACKELFORD, 2009).

Os compósitos são diferenciados de acordo com as características do reforço presente, conforme está esquematizado na Figura 14. A classificação envolve os parâmetros (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação do reforço.

Figura 14 – Esquema das possíveis distribuições do reforço no compósito em função dos diferentes parâmetros



Fonte: Shackelford, (2009, p. 629).

A classificação do reforço pode ocorrer, também, de acordo com a sua disposição na matriz. Este apresenta as seguintes classificações: particulado, com alta rigidez, com baixa resistência e com baixa tenacidade; fibras curtas (descontínuas), com alta rigidez, com baixa resistência e com baixa tenacidade; fibras longas (contínuas), com alta rigidez, com alta resistência e com alta tenacidade (ANCELOTTI JR., 2006; SHACKELFORD, 2009).

Figura 15 – Esquema da classificação de reforços em compósitos

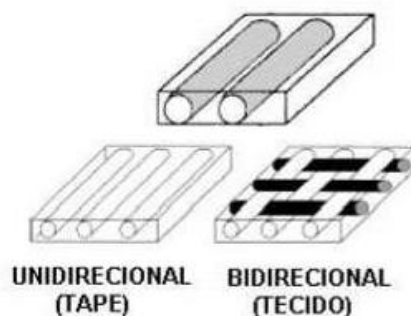
a) particulados



b) fibras descontínuas



c) fibras contínuas



Fonte: Ancelotti Jr. (2006, p. 17).

Os reforços de fibra contínua podem ser classificados em dois tipos: os trançados (tecidos); e os costurados pelo arranjo de fitas unidirecionais e de tecido biaxial.

Nos tecidos, as fibras podem, também, ser mantidas em sua posição por meio de costura com fios sintéticos (poliéster, poliamida), com o arranjo dos filamentos em uma, duas, três e quatro direções, na direção da trama, do urdume ou, até mesmo, a 45°.

As tensões de tração e de flexão em fibras orientadas em 90° são superiores, pois as tensões são distribuídas igualmente por todas as fibras e transmitidas ao longo de seus eixos principais (x e y) (DHANRAJ PAMAR *et al.*, 2015). Segundo os autores, maiores deformações são observadas com o ângulo de 30°; entretanto, camadas sobrepostas com ângulos diferentes de 90° resultam em concentradores de tensão, causando a ruptura precoce do corpo de prova.

3.2.1 Tipos de fibras

Comumente, as fibras podem ser classificadas pelo seu material de fabricação. De maneira abrangente, são divididas entre fibras vegetais e fibras

sintéticas. As fibras vegetais são, geralmente, classificadas de acordo com sua origem e podem ser agrupadas como está exposto no Quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de fibras vegetais

<i>Tipo de Fibra</i>	<i>Origem vegetal</i>
fibras de semente	algodão
fibras de caule	bananeira, juta, linho, cânhamo
fibras de folha	sisal, piaçava, curauá, abacá, henequém
fibras de fruto	coco
fibras de raiz	zacatão

Fonte: Adaptado de Silva (2011, p. 15).

Diversos estudos apontam a utilização dessas fibras em materiais compósitos, visto que apresentam propriedades mecânicas robustas quando são utilizadas como reforço com resinas poliméricas. Porém, alguns fatores podem influenciar compósitos com fibras naturais. As fibras vegetais, em geral, não têm propriedades uniformes; apresentam, ao contrário, grandes variações nos valores de suas propriedades (NASCIMENTO, 2009). Podem, ainda, acrescentar outras desvantagens aos compósitos, como incompatibilidade com matrizes poliméricas hidrofóbicas; uma tendência de formar agregados durante o processamento; e o “inchaço” das fibras ao absorver umidade (SILVA, 2011).

Atualmente, as principais fibras utilizadas, comercialmente, em aplicações na engenharia civil são as sintéticas, incluindo o *Glass Fiber-Reinforced Polymer* (GFRP), o *Carbon Fiber-Reinforced Polymer* (CFRP) e o *Aramid Fiber-Reinforced Polymer* (AFRP), que utilizam fibras de vidro, de carbono e de aramida, respectivamente. Dentre esses, um dos materiais mais utilizados como reforço de estruturas é o CFRP, traduzido como polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC).

Os polímeros reforçados com fibras de carbono têm atraído a atenção de muitos pesquisadores (BEBER, 2003; BEIM, 2008; GALLI, 2016) envolvidos com aplicações na engenharia estrutural. De acordo com Beber (2003), esses polímeros se destacam, principalmente, por apresentar as maiores relações entre resistência, rigidez e seu próprio peso. As fibras de carbono mantêm a alta resistência e a rigidez sob temperaturas elevadas; à temperatura ambiente, não são afetadas pela umidade e pela ação de vários solventes, ácidos e bases.

Abraçam uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos se adequem, com grande versatilidade, a diversas aplicações em engenharia. Além disso, processos de fabricação de fibras e de compósitos se encontram altamente desenvolvidos, são relativamente baratos e ostentam uma excelente relação custo-benefício.

A fibra de carbono é produzida por meio da oxidação controlada, da carbonização e da grafitação de materiais ricos em carbono que já se encontram na forma de fibras. O objetivo é remover, pela forma gasosa, todos os elementos que não sejam carbono. No caso das fibras de alta resistência (4 GPa), é tolerado um teor de até 5% de nitrogênio (ORTIZ, 2008).

As fibras de carbono resultam do tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras orgânicas, tais como o poliacrilonitril (PAN) e aquelas com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH), em um ambiente inerte. Podem ser obtidas, igualmente, por meio de fibras de rayon (MACHADO, 2006).

Dependendo dos parâmetros de processamento, as fibras podem ter inúmeras variações de propriedades mecânicas. Então, serão classificadas quanto aos tipos de precursor, de propriedades mecânicas (resistência e módulo) e de temperatura de tratamento final (BARROS, 2009). Uma classificação comercial bastante utilizada diz respeito às propriedades de resistência e de elasticidade (Quadro 2). Considerando isso, poderão ser classificadas como fibras de uso geral, de alta resistência, de ultra-alta resistência, de alto módulo e de ultra-alto módulo (ANCELOTTI JR., 2006; MACHADO, 2006).

Quadro 2 – Características genéricas das fibras de carbono

<i>Tipo de Fibra de Carbono</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>Resistência Máxima de Tração (MPa)</i>	<i>Deformação de Ruptura (%)</i>
De uso geral	220 – 235	< 3.790	> 1,2
Alta resistência	220 – 235	3.790 – 4.825	> 1,4
Ultra alta resistência	220 – 235	4.825 – 6.200	> 1,5
Alto módulo	345 – 515	>3.100	> 0,5
Ultra alto módulo	515 – 690	>2.410	> 0,2

Fonte: Machado (2006, p. 2).

Além dessas classificações, Ancelotti Jr (2006) trouxe mais duas – fibras de módulo padrão e de módulo intermediário –, chegando a valores aproximados de 230 GPa e de 270 GPa, respectivamente.

3.3 PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS

Atualmente, existem muitos processos disponíveis para o processamento de compósitos termorrígidos. Os mais utilizados são a laminação manual ou *handlay-up*; a infusão por vácuo (*Vacuum Infusion Process* (VIP)); a moldagem (*Resin Transfer Moulding* (RTM)); e a laminação pelo uso de pré-impregnados (BARROS, 2009).

Alguns processos são bem simples e envolvem pouca tecnologia e intenso trabalho manual, enquanto outros fazem uso de ferramentas sofisticadas e de controles computacionais. No entanto, todas as técnicas de processamento têm um ponto em comum: o uso de ferramentas, denominadas moldes, para manter o reforço na posição desejada enquanto a resina é curada.

O processamento de materiais compósitos necessita, ainda, de alguma maneira, do uso de algum artifício para forçar a migração da matriz polimérica para dentro do reforço (MASTBERGEN, 2004). A qualidade final da peça, as limitações de tamanho e de geometria, o custo do ferramental e o tempo de processamento são as diferenças principais entre técnicas de processamento.

O tempo de processamento da matriz está atrelado, diretamente, ao tipo e à proporção do endurecedor utilizado, que, por sua vez, está ligado à técnica de processamento e aos parâmetros ambientais de processamento do produto. Caso as proporções adequadas entre resina e endurecedor não sejam consideradas, não se pode garantir a cura completa da resina e, conseqüentemente, as melhores propriedades finais do produto.

A fabricação de um compósito polimérico termorrígido, não importando o tipo de molde utilizado, é realizada em três etapas principais, de acordo com Barros (2006): adaptação do material de reforço ao molde, obtendo-se, desse modo, a forma e a dimensão desejadas; impregnação do reforço pela matriz polimérica; e cura da resina, com o enrijecimento do material compósito e a desmoldagem da peça final.

No processo de infusão por vácuo, as camadas de reforço de fibra são mantidas entre um molde rígido e uma membrana flexível, perifericamente selada ao molde. O espaço da cavidade formada é evacuado parcialmente, para comprimir e para compactar o reforço. A resina é, então, introduzida na cavidade do molde, que se encontra sob a influência do vácuo, favorecendo, assim, a criação de um fluxo da matriz polimérica por meio do molde, com a consequente impregnação do reforço. Após a cura, a membrana é retirada, e o laminado é desmoldado (OWEN; MIDDLETON; JONES, 2000).

Alguns benefícios, como qualidade e reprodutibilidade, são verificados na infusão por vácuo, em comparação à laminação manual, assim como melhores propriedades mecânicas do laminado produzido. Nesse caso, o compósito apresenta uma distribuição mais homogênea fibra-resina; o tempo de processamento é menor do que o verificado na laminação manual; e há a promoção de um ambiente de trabalho mais limpo e menos agressivo à saúde. Entretanto, a técnica de infusão por vácuo pode conferir ao processamento de compósitos estruturais com fibras contínuas alguns tipos de defeitos que promoverão a degradação das propriedades mecânicas do artefato. Dentre esses, destacam-se o desalinhamento de fibras e ondulações no plano e fora do plano, que prejudicarão o desempenho mecânico do laminado compósito.

No caso do reforço em estudo, o processamento utilizado para fabricação das cavilhas reforçadas foi o *Handlay-up*, também conhecido como processamento manual. A escolha do processo se deveu à indisponibilidade de equipamentos para o envolvimento da fibra no pino circular de madeira. Nasseh (2008) defende que outros métodos de laminação mais avançados diminuem a competitividade desse processo, principalmente no que diz respeito à eficiência, à resistência, à velocidade de construção e ao custo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os principais materiais utilizados neste trabalho foram a madeira de maçaranduba (*Manilkara sp.*), o tecido de fibra de carbono e a resina epóxi. Foram realizados ensaios com base nas recomendações normatizadas para a madeira utilizada na fabricação das cavilhas, com o objetivo de caracterizá-la física e mecanicamente. A aplicação do reforço na cavilha foi feita por meio do envolvimento do tecido de fibra de carbono com a resina epóxi.

Esta pesquisa foi realizada com os equipamentos do Laboratório de Madeiras (LabMad), do Laboratório de Estruturas S. P. Timoshenko, do Laboratório de Ensaio e Caracterização de Materiais (LedMa) e do Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), todos afiliados à Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Madeira

Por ser largamente utilizada na construção civil no Brasil, optou-se por trabalhar com a madeira do gênero *Manilkara*, comercialmente conhecida como maçaranduba. Foi utilizada na confecção dos corpos de prova para caracterização física e mecânica, das cavilhas e das peças serradas que compuseram o corpo de prova das ligações.

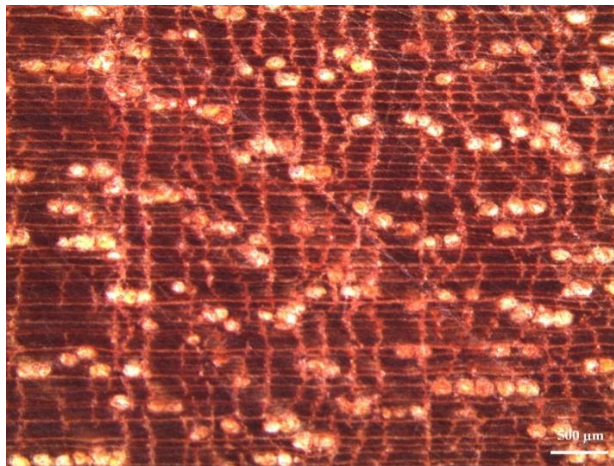
Os corpos de prova foram produzidos a partir das peças de maçaranduba com seção comercial de 14,5 cm x 5,5 cm. Ao todo, foram adquiridas 24 peças com 3 m de comprimento e com seção transversal de 14 x 5 cm, totalizando um volume de 0,554 m³ de madeira adquirida.

4.1.1.1 Caracteres anatômicos

Para identificação dos caracteres anatômicos da madeira, foi retirada uma amostra de (14,5 cm x 5,5 cm x 5 cm) de uma das peças de 3 m. Em seguida, a amostra foi lixada e preparada para ser analisada no Laboratório de Identificação de Madeiras da UFBA. Então, foi submetida a uma análise macroscópica com lupa conta-fio, no sentido transversal. Realizou-se, também, uma fotografia com

estereomicroscópio com aumento de 20 vezes, como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Imagem da Maçaranduba tirada com estereomicroscópio



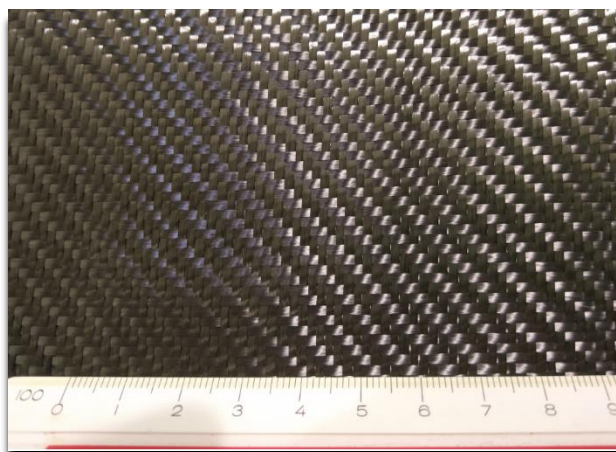
Fonte: Elaborada pelo autor.

De posse das descrições e das fotografias, as identificações foram realizadas por meio da comparação com outras descrições catalogadas (*speciesLink network* e *DELTA/Intkey*). A partir dessas informações, concluiu-se que a madeira estudada se tratava, de fato, do gênero *Manilkara*.

4.1.2 Fase dispersa – Fibra de Carbono

Para a técnica de reforço com PRFC proposta, foi utilizado um tecido de fibra de carbono bidirecional ($0^{\circ}/90^{\circ}$) (Figura 17), escolhido por meio da matriz de decisão que será descrita na seção seguinte.

Figura 17 – Tecido de fibra de carbono bidirecional



Fonte: Elaborada pelo autor.

O tecido adquirido tem desenho sarja 2x2, tratamento cru, 5,0 (+/-0,2) fios/cm, 206 g/m², espessura de 0,40 mm e ausência de furos (dados fornecidos pelo fabricante). Ao todo, foi adquirida uma quantidade de 6 m² de tecido de fibra de carbono para laminação das cavilhas.

4.1.3 Fase matriz – Resina epóxi

As resinas epóxi correspondem ao produto da reação de condensação entre a epícloridrina e o bisfenol A, também conhecido como éter de diglicidilbisfenol A (DGEBA) (PARDINI; PERES, 1996).

O sistema da resina epóxi adotado é composto por dois componentes: resina base e endurecedor (agente de cura). Como material utilizado em função de matriz no reforço, optou-se por trabalhar com o sistema de resina epoxídica comercialmente encontrado como ARALDITE® GY 250 (resina) e com o SQ 3154 (endurecedor). A resina epóxi utilizada, segundo a ficha técnica do fabricante, é uma resina epóxi líquida, não modificada, de média viscosidade, formulada à base de bisfenol A.

Para execução dos reforços nas cavilhas, foi adquirida uma quantidade total de 4 kg de resina base epóxi e 2 kg do endurecedor. O processamento da mistura resina/endurecedor ocorreu em temperatura ambiente, e a aferição das massas foi feita por meio de balança digital.

4.2 MÉTODOS

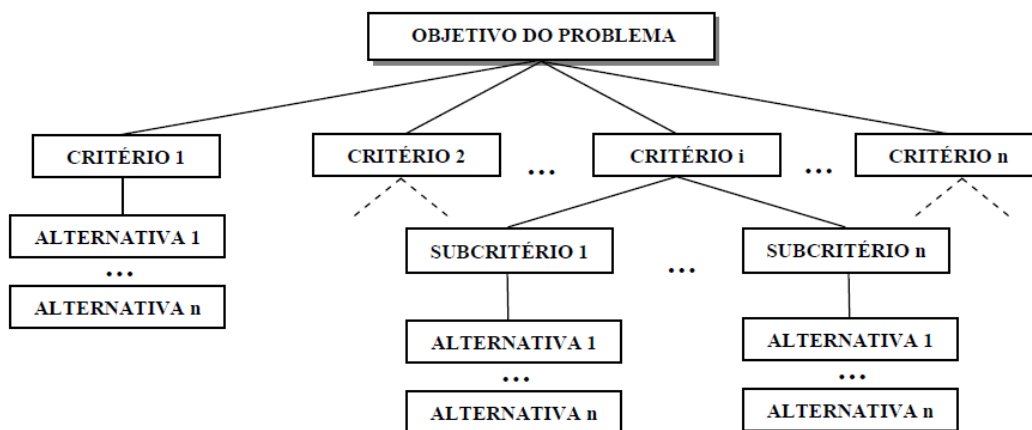
4.2.1 Matriz Hierárquica para escolha da fibra

Como uma ferramenta alternativa de tomada de decisão, o método de Análise Hierárquica dos Processos (AHP), baseado em critérios analisados de forma qualitativa e quantitativa, foi adotado, neste trabalho, para a avaliação das fibras. O intuito disso era o de saber qual material seria o mais apropriado para a execução do reforço.

O método AHP, proposto por Saaty no início dos anos 70, tem, por objetivo, a escolha de determinada alternativa dentre outras, de forma que tal seleção esteja fundamentada em critérios de avaliação (PERELLES; MEDEIROS; GARCEZ., 2013). A análise por meio do processo AHP é estruturada para uma tomada de decisão em ambientes complexos em que diversas variáveis ou

critérios são considerados para a priorização e para a seleção de alternativas. A Figura 18 ilustra a hierarquia e a relação entre os critérios e os subcritérios que levam à escolha de uma alternativa.

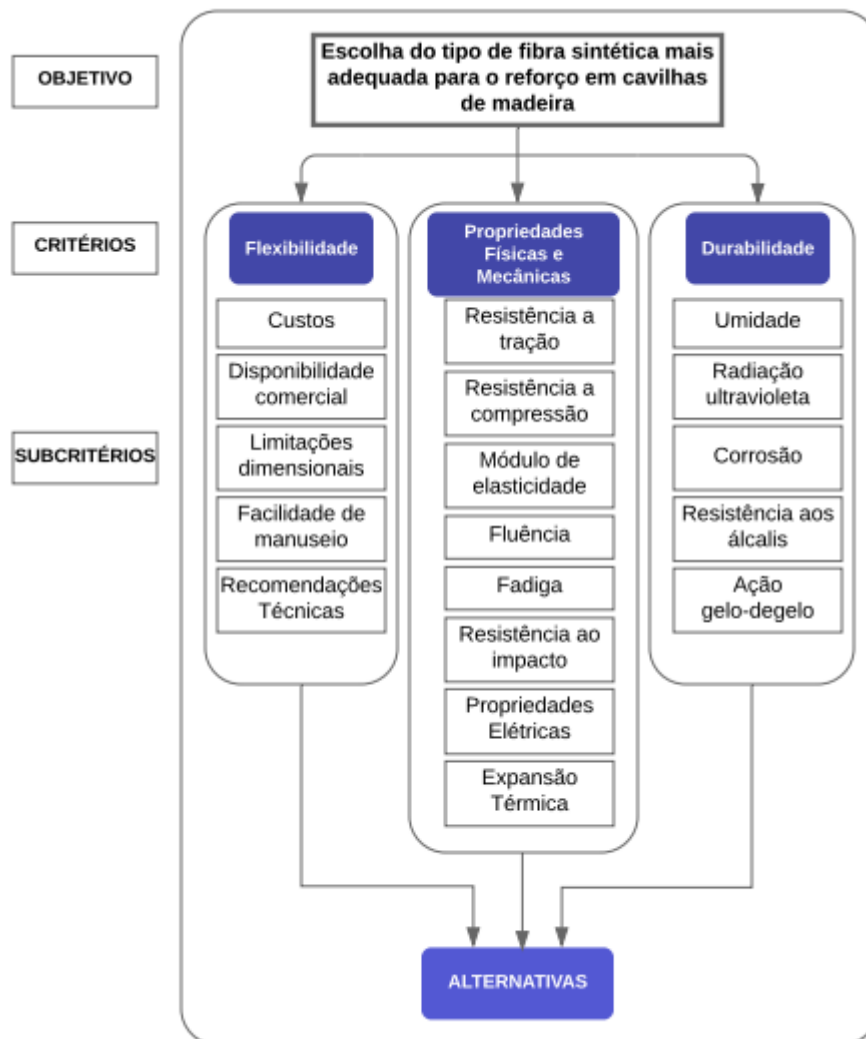
Figura 18 – Árvore de critérios e de subcritérios da AHP



Fonte: Ferreira; L'Hotellier e Passos (2007, p. 2).

A metodologia é formada, basicamente, por quatro etapas: (1) definição dos critérios e dos subcritérios; (2) definição das alternativas e do seu relacionamento com os critérios; (3) definição da hierarquia do problema abordado; e (4) aplicação do processo AHP (ROSA; STEINER; COLMENERO, 2015). Com base nessa configuração, foram feitas as análises dos critérios flexibilidade, resistência mecânica e durabilidade; e das variáveis (subcritérios) pertencentes a cada um. Na Figura 19, é possível observar a definição dos critérios e dos subcritérios adaptados ao problema de escolha da melhor fibra.

Figura 19 – Configuração do processo AHP



Fonte: Adaptada de Perelles, Medeiros e Garcez (2013, p. 172).

As alternativas foram determinadas por meio de um levantamento de fibras comerciais disponíveis no mercado nacional. O levantamento resultou em um rol de 14 diferentes tipos de fibras sintéticas para reforço, de modo a se obter a opção mais apropriada para compor o compósito proposto. As fibras, que, em sua maioria, têm uma nomenclatura comercial, foram identificadas, genericamente, da “Fibra 1” à “Fibra 14”.

4.2.1.1 Relacionamento entre critérios

Para a determinação da importância relativa de cada critério, estes foram comparados por meio de uma escala que determinou sua importância em relação aos demais. No Quadro 3, está a matriz de importância elaborada.

Quadro 3 – Matriz de importância para cada critério

Escala de importância 1/2 - Menos importante 1 - Igual importância 2 - Mais importante	Flexibilidade	Resistencia mecânica	Durabilidade	Total Parcial	Importância relativa
Flexibilidade	1	1/2	1/2	2	0,2
Resistencia mecânica	2	1	1	4	0,4
Durabilidade	2	1	1	4	0,4
Total Geral				10	1

Fonte: Adaptado de Perelles, Medeiros e Garcez (2013, p. 173).

A importância relativa é a relação entre o total obtido por cada critério sobre o total geral. Determinou-se que as variáveis do critério de flexibilidade, apesar de constituírem certa relevância para escolha do compósito, não devem ser avaliadas como mais importantes do que as demais. A partir dessa matriz, foi obtido um valor de importância relativa, chegando-se aos valores ponderados alcançados por cada critério.

4.2.1.2 Relacionamento entre subcritérios

As variáveis relacionadas aos critérios foram confrontadas. Dessa forma, estabeleceu-se uma priorização, para garantir que o objetivo do estudo fosse atingido. No Quadro 4, está a relação entre as variáveis relacionadas ao critério flexibilidade. O mesmo procedimento foi realizado para os demais critérios.

Quadro 4 – Relação entre as variáveis do critério flexibilidade

Escala de importância 1/2 - Menos importante 1 - Igual importância 2 - Mais importante	Custos	Disponibilidade comercial	Limitações dimensionais	Facilidade de manuseio	Recomendações técnicas	Total parcial	Importância relativa
Custos	1	1	1/2	1	1/2	4,00	0,15
Disponibilidade comercial	1	1	1/2	1/2	1/2	3,50	0,13
Limitações dimensionais	2	2	1	1/2	1	6,50	0,25
Facilidade de manuseio	1	2	1/2	1	1/2	5,00	0,19
Recomendações técnicas	2	2	1	1	1	7,00	0,27
Total geral						26,00	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira análoga aos parâmetros utilizados anteriormente no relacionamento entre critérios, também foi definido um valor de importância relativa, com base na qual se estabeleceram os valores ponderados correspondentes a cada subcritério.

4.2.1.3 Desempenho das alternativas

Para se estabelecer a avaliação do desempenho de cada alternativa, estas foram analisadas em função de cada variável apresentada. O Quadro 5 demonstra o desempenho das três alternativas mais bem posicionadas quanto ao critério flexibilidade.

Quadro 5 – Desempenho das alternativas em relação a flexibilidade

<u>Escala de importância</u> 1 - Inadequado 2- Suficiente 3 - Bom 4 - Muito bom	Atribuição de valores			Homogeneização dos dados			Peso da variável	Desempenho de cada alternativa		
	Fibra 1	Fibra 2	Fibra 3	Fibra 1	Fibra 2	Fibra 3		Fibra 1	Fibra 2	Fibra 3
Custos	109	109	160	1,00	1,00	0,68	0,15	15,38	15,38	10,48
Disponibilidade comercial	2	2	2	1,00	1,00	1,00	0,13	13,46	13,46	13,46
Limitações dimensionais	3	3	3	1,00	1,00	1,00	0,25	25,00	25,00	25,00
Facilidade de manuseio	1	2	1	0,50	1,00	0,50	0,19	9,62	19,23	9,62
Recomendações técnicas	3	3	3	1,00	1,00	1,00	0,27	26,92	26,92	26,92
Total Geral							1,00	90,38	100,00	85,48

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados referentes ao custo das fibras foram obtidos por meio ou das empresas ou de representantes comerciais dos produtos. Desse modo, os resultados dessas variáveis foram avaliados de forma quantitativa. Como o valor do custo é inversamente proporcional, na homogeneização dos dados, foi feita uma ponderação, de modo a pontuar com maior peso a fibra de custo mais atrativo. Os demais parâmetros são considerados qualitativos, de forma que são avaliados por observação e não resultam em valores numéricos. Segundo Perelles, Medeiros e Garcez (2013), a possibilidade de interpretar, conjuntamente, grandezas quantitativas e qualitativas com uma visão sistêmica é uma das vantagens da aplicação da análise hierárquica.

4.2.1.4 Avaliação das alternativas

A análise de desempenho das alternativas foi realizada em função de cada subcritério, para que se possa determinar qual fibra é mais apropriada aos critérios apresentados. Os valores referentes aos critérios “Propriedades físicas e mecânicas” e “Durabilidade” obtidas por meio do estudo de Perelles, Medeiros e Garcez (2013). As matrizes desenvolvidas por estes pesquisadores estão presentes no anexo deste trabalho. A avaliação final das alternativas pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 – Avaliação final das alternativas

	Importância relativa	Flexibilidade	Propriedades físicas e mecânicas	Durabilidade	Avaliação final
		0,20	0,40	0,40	
Alternativas	Fibra carbono 300C	90,38	87,66	88,79	88,66
	Fibra carbono CC-0201	100,00	87,66	88,79	90,58
	Fibra carbono CC-0202	85,48	87,66	88,79	87,68
	Fibra carbono CC-0203	85,48	87,66	88,79	87,68
	Fibra carbono CC-0204	85,48	87,66	88,79	87,68
	Fibra carbono CC-0240	85,48	87,66	88,79	87,68
	Fibra carbono CC-0242	80,32	87,66	88,79	86,64
	Fibra carbono 200	80,32	87,66	88,79	86,64
	Fibra vidro 300	100	51,51	59,91	64,57
	Fibra vidro 450	100	51,51	59,91	64,57
	Fibra vidro 110	100	51,51	59,91	64,57
	Fibra vidro 200	100	51,51	59,91	64,57
	Fibra vidro 330	100	51,51	59,91	64,57
	Fibra aramida	80,32	70,05	73,71	73,57

Fonte: Elaborada pelo autor.

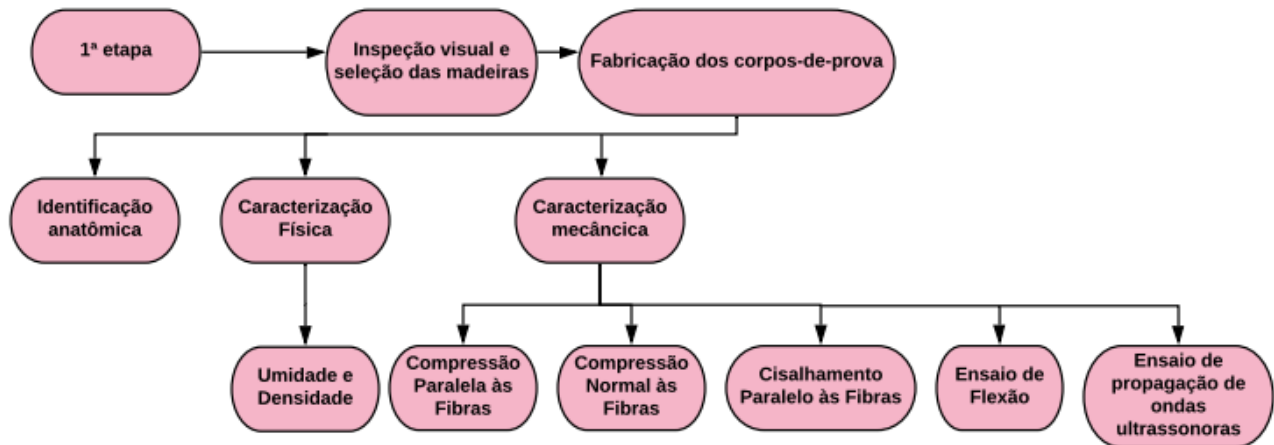
Após o cumprimento das etapas da AHP, o cálculo da avaliação de desempenho final de cada alternativa foi realizado, levando em conta a ponderação relativa, que analisou a importância de cada critério em relação aos demais. Das alternativas avaliadas, a fibra mais bem posicionada (fibra carbono CC-0201) alcançou 90,58 pontos, sendo um tecido de fibra de carbono. O tecido escolhido é conformado a partir da poliacrilonitrila (PAN); e tem padrão sarja 2x2, 200g/m², direção 90° trama/urdume, sendo fornecido em tecidos com largura de 1,27 m.

4.2.2 Programa experimental

O estudo foi desenvolvido por meio de um programa experimental, dividido em três etapas, o qual está representado em seus respectivos fluxogramas.

A Figura 20 descreve a 1ª etapa do programa experimental.

Figura 20 – 1ª etapa do programa experimental



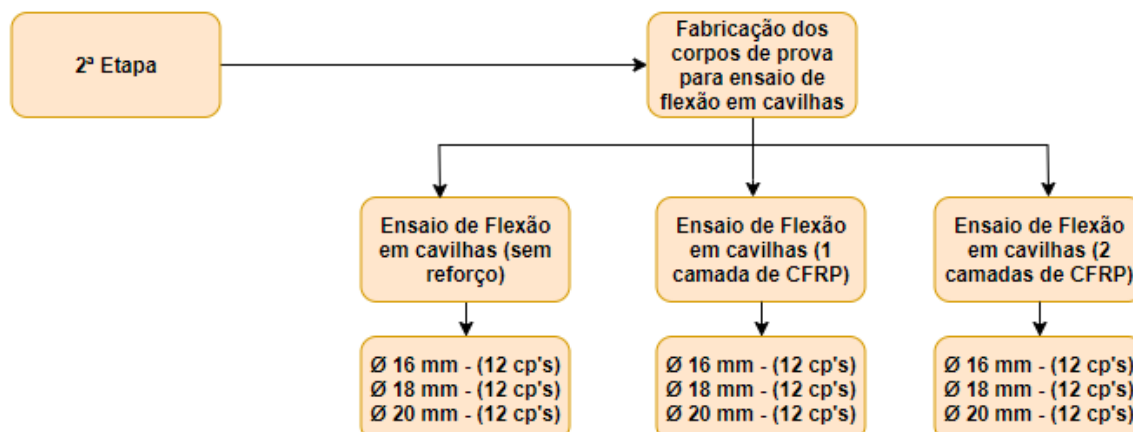
Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira etapa se iniciou com a inspeção visual das peças de madeira, necessária para visualização dos defeitos de formação encontrados na madeira, com o intuito de selecionar as peças de madeiras adequadas à pesquisa. Vale ressaltar que a inspeção também foi realizada nos corpos de provas confeccionados.

Após a seleção das peças de madeira, o material seguiu para fabricação dos corpos de prova para os ensaios de caracterização. Nessa fase, foram realizados os ensaios para verificação das propriedades físicas (ensaios de umidade e de densidade) e mecânicas (compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e flexão) da madeira, sugerida pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Além da caracterização mecânica feita por meio de ensaios destrutivos, houve, por outro lado, a caracterização mecânica por meio do ensaio de propagação de ondas sonoras, constituindo, assim, mais um parâmetro para caracterização da madeira.

A Figura 21 descreve a 2ª etapa do programa experimental.

Figura 21 – 2ª etapa do programa experimental

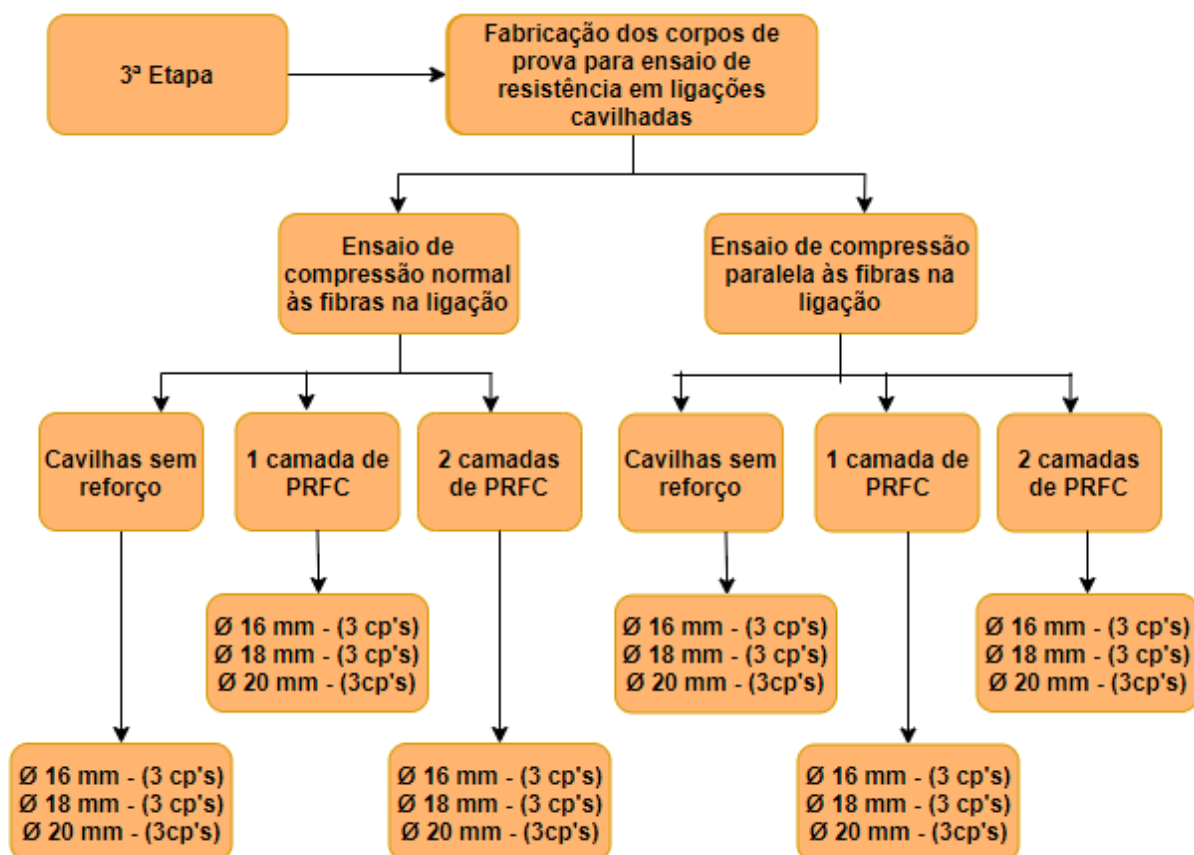


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na 2ª etapa (fabricação dos corpos de prova para ensaio de flexão em cavilhas), foi feita a confecção das cavilhas com e sem reforço para realização dos ensaios de flexão. O procedimento de preparação dos conectores e do reforço com fibra de carbono são descritos nas seções seguintes. Foram produzidas cavilhas de diâmetros empregados em estruturas e recomendados pela NBR 7190 (ABNT, 1997) (16mm, 18mm e 20mm), variando em cavilhas sem reforço e com reforço (1 e 2 camadas de fibra).

A Figura 22 descreve a 3ª etapa do programa experimental.

Figura 22 – 3ª etapa do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na 3ª etapa (fabricação dos corpos de prova para ensaio de resistência de ligações cavilhadas), foram fabricados modelos de ligação com cavilhas para o ensaio de compressão paralela na ligação e de compressão normal na ligação. Em cada modelo de ligação, utilizaram-se duas cavilhas com diâmetros de 16mm, de 18mm e de 20 mm de diâmetro. As cavilhas empregadas nos corpos de prova da ligação continham ou uma ou duas camadas de PRFC. Também foram confeccionados corpos de prova da ligação sem reforço, para aferir a eficiência da técnica utilizada.

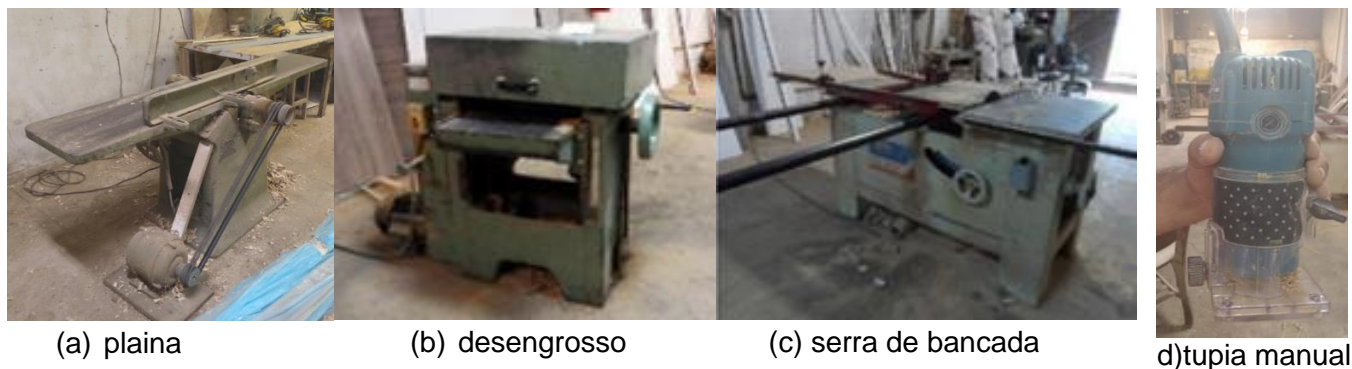
4.2.3 Produção dos corpos de prova

4.2.3.1 Produção dos corpos de prova para o ensaio de caracterização

A produção dos corpos de prova foi realizada na carpintaria do Laboratório de Madeiras do Departamento de Construção e Estruturas da Escola Politécnica

(D.C.E. – E.P.) da UFBA. Para a produção dos corpos de prova, foram utilizadas as seguintes máquinas disponíveis na carpintaria: plaina, desengrosso, serra circular de bancada e tupia manual (Figura 23).

Figura 23 – Máquinas utilizadas na fabricação dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir do lote de madeira recebido, foram selecionadas peças de madeira referentes aos ensaios de caracterização física e mecânica para fabricação das cavilhas. As demais foram destinadas a compor os corpos de prova de ligação. De cada peça, foi extraído um corpo de prova para cada um dos ensaios de flexão, de cisalhamento, de compressão normal e de compressão paralela. Das mesmas peças separadas para confecção dos corpos de prova dos ensaios destrutivos, foram extraídas as cavilhas de 16 mm, de 18 mm e de 20 mm. De cada peça, foi extraído um corpo de prova para cada ensaio destrutivo.

Foram realizados ensaios de ultrassom nas peças de 1,80 m e de 1,20 m e nos corpos de prova de compressão paralela (5 cm x 5 cm x 15 cm), de forma a avaliar se as partes distintas do tronco apresentariam diferenças significativas.




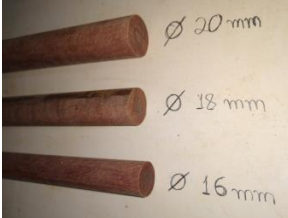

Os segmentos de 1,80 m foram destinados à produção das cavilhas e dos corpos de prova para os ensaios de compressão (normal e paralela), de flexão e de cisalhamento. Por sua vez, os segmentos de 1,20 m e as toras remanescentes foram destinadas à fabricação das peças que compõem os ensaios de ligação.

A sequência de produção das cavilhas, do reforço com PRFC e dos corpos de prova utilizados nos ensaios das ligações estão descritas nas seções seguintes.

4.2.3.2 Produção das cavilhas reforçadas

As cavilhas reforçadas destinadas ao ensaio de flexão e às ligações (compressão normal e paralela) foram obtidas a partir de peças de seção quadrada, com diâmetros finais de 16 mm, de 18 mm e de 20 mm. O processo de fabricação das cavilhas (Quadro 6) envolveu as etapas de aparelhamento e de usinagem.

Quadro 6 – Sequência de fabricação das cavilhas e os respectivos equipamentos utilizados





		Operação	Equipamento	Produto
Etapas	Aparelhamento	Esquadreamento da madeira	Plaina e desengrosso	Peças de madeira com seção retangular
		Corte das peças em seções menores	Serra circular	Peças com seção quadrada 
	Usinagem	Fresamento periférico	Tupia	Peças com seção oitavada 
		Lixamento contínuo	Serra de bancada com lixa acoplada	Peças de seção redonda 
Produto Final		Cavilhas prontas	 	


Fonte: Elaborado pelo autor.

A etapa subsequente à produção das cavilhas foi a de aplicação do reforço com a fibra de carbono, ilustrada no Quadro 7. O reforço envolveu as etapas de preparação do tecido, de corte do tecido, de preparação do epóxi, de

envolvimento da fibra na cavilha e de retirada da fita adesiva. A colocação da fita adesiva foi a solução encontrada para evitar o desalinhamento das fibras na etapa de corte. A fita também proporcionou ao tecido uma melhor manuseabilidade ao envolver a fibra na cavilha.

Quadro 7- Sequência de reforço das cavilhas e os respectivos equipamentos utilizados. (continua)

		Operação	Equipamento/Ferramen	Produto
Etapas	Preparação do tecido	Colagem de fita adesiva para evitar o desalinhamento das fibras 	Tesoura e fita adesiva de papel	
	Corte do tecido	Corte do tecido, considerando a área de envolvimento nas cavilhas	Tesoura, esquadro e régua	Tecido na medida para envolvimento na cavilha
	Preparação do sistema epóxi	Preparação do sistema epóxi (resina e endurecedor)	Copo plástico/silicone e balança digital	Sistema epóxi em processo de cura, pronto para laminação na cavilha
	Impregnação	Impregnação do tecido de fibra de carbono com o sistema epóxi 	Pincel e rolo desaerador	Tecido de fibra de carbono impregnado com resina epóxi
	Envolvimento da fibra na cavilha	Envolver tecido de fibra de carbono na cavilha 	Lona plástica antiaderente ao epóxi	Cavilha envolvida no tecido; peça pronta para cura de 24 horas

	Retirada da fita adesiva	Retirar fita adesiva	Tesoura/estilete	Cavilha reforçada sem fita adesiva
Produto	Cavilhas reforçadas com fibra de carbono 			






Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa de preparação do tecido, primeira operação do Quadro 7, foram utilizadas fitas adesivas comercializadas como fita *kraft* ou fita *tartan* para envolver a área do tecido destinada à laminação das cavilhas. Após essa etapa, o tecido foi cortado de acordo com as dimensões necessárias para o cobrimento da cavilha. Para execução do trabalho, utilizou-se um estilete e luvas de tecido para proteção das mãos. O tempo gasto para remover a fita adesiva foi de, aproximadamente, 15 minutos, para as cavilhas menores (12 cm); e de 30 a 45 minutos, para os conectores de maior comprimento (41 cm), que foram destinadas ao ensaio de flexão das cavilhas.

4.2.3.3 *Produção dos corpos de provas para o ensaio de resistência das ligações*

A etapa subsequente ao reforço das cavilhas foi a da montagem das ligações. A preparação dos corpos de prova envolveu as etapas de fabricação das peças que compõem o corpo de prova, a marcação dos locais de pré-furação, a execução dos furos e a colocação das cavilhas. No Quadro 8, é apresentada a sequência de fabricação dos corpos de prova utilizados no ensaio das ligações.

Quadro 8 – Sequência de fabricação dos corpos de prova utilizados no ensaio das ligações

		Operação	Equipamento/Ferramenta	Produto final
Etapas	Fabricação das peças	Adequação das peças de madeira às dimensões pré-estabelecidas para o ensaio	Plaina, desengrosso e serra de bancada	Peças para compor os corpos de prova para ensaios na ligação
	Marcação dos locais dos furos		Esquadro e pincel	Peças com marcação dos locais de pré-furação
	Furação das peças		Furadeira de bancada e sargento para fixação das peças. Foram utilizadas brocas com o diâmetro comercial de: <ul style="list-style-type: none"> • 16 mm ▪ 17 mm ▪ 18 mm ▪ 19 mm ▪ 20 mm ▪ 7/8" (22 mm) Para garantir um melhor ajuste das cavilhas, algumas brocas tiveram o seu diâmetro reduzido com um moto esmeril.	Peças com pré-furação, de acordo com a norma NBR 7190
	Encaixe das cavilhas		Martelo	Peças unidas com as cavilhas
Produto	Corpos de prova para o ensaio de compressão normal e paralela às fibras na ligação	 Compressão normal às fibras	 Compressão paralela às fibras	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A adição de camadas de fibra de carbono à cavilha de madeira resulta no aumento de diâmetro do conector. O reforço do conector, por vezes, resulta em

diâmetros diferentes dos diâmetros das brocas comerciais. Para facilitar a cravação das cavilhas, estas receberam, na extremidade, uma pequena conicidade.

Para verificar a influência do reforço na variação dimensional do pino, foi realizado um ensaio de estabilidade dimensional, conforme os procedimentos da NBR 7190 (ABNT, 1997), comparando os diferentes diâmetros e as condições de reforço analisadas. Foram ensaiadas 6 cavilhas de cada diâmetro e de cada tipo, totalizando 18 cavilhas por diâmetro e 54 cavilhas no total. O comprimento dos pinos para esse ensaio foi de 5 cm. A Figura 24 apresenta as cavilhas na estufa. Na Tabela 3, estão os resultados da variação volumétrica da seção transversal encontrada no ensaio.

Figura 24 – Cavilhas na estufa para avaliação da estabilidade dimensional



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de estabilidade dimensional em cavilhas com e sem reforço

Diâmetro - condição de reforço	Área seca (cm ²)	Área saturada (cm ²)	Variação (%)	Volume seco (cm ³)	Volume saturado (cm ³)	Variação (%)
16-SR	2,27	2,67	17,42	11,43	13,44	17,58
16-1C	3,12	3,20	2,53	15,67	15,79	0,76
16-2C	3,20	3,26	1,62	16,11	16,40	1,77
18-SR	3,01	3,48	15,40	15,15	17,53	15,71
18-1C	3,88	3,91	0,63	19,47	19,65	0,91
18-2C	4,09	4,17	2,12	20,56	21,05	2,38
20-SR	4,04	4,87	20,44	20,31	24,48	20,51
20-1C	4,70	4,86	3,38	23,74	24,55	3,39
20-2C	4,73	4,81	1,75	23,83	24,27	1,84

Fonte: Elaborada pelo autor.

A variação dos valores médios, tanto para a seção transversal quanto para o volume, foi maior para as cavilhas sem reforço. Os resultados obtidos por meio da verificação da estabilidade permitem inferir que as cavilhas com reforço apresentam uma variação dimensional menor do que as cavilhas não reforçadas ao serem submetidas à saturação.

Concluiu-se que a contração das cavilhas por meio da secagem prévia em estufa não seria igual a das cavilhas sem reforço. Além disso, a elevação da temperatura pode influenciar no desempenho mecânico dos compósitos de fibra e de matriz polimérica (YANG; SMITH; WANG, 2018). Ademais, grandes variações na temperatura podem provocar o surgimento de fissuras entre as fibras da cavilha, o que poderia implicar seu desempenho como elemento estrutural. Portanto, optou-se por submeter as cavilhas à secagem de maneira mais branda e com a utilização de um ventilador. O teor de umidade instantâneo verificado nas cavilhas não aproveitadas no momento da colocação foi de 12%, um pouco abaixo da umidade de equilíbrio local, que está em torno de 16%.

4.2.4 Ensaio de caracterização das propriedades físicas da madeira

Com o objetivo de determinar as características físicas da madeira empregada na produção dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de densidade e de umidade, conforme os procedimentos presentes na norma ABNT NBR 7190 (1997). Foram utilizados os seguintes equipamentos (Figura 25): estufa

digital, modelo SL-100, para ensaios de umidade e de densidade; balança digital com exatidão de 0,01 g, também para os ensaios de umidade e de densidade. O medidor de umidade com agulhas modelo Digisystem DL 822 foi utilizado para aferição instantânea da umidade das madeiras. A utilização do medidor de umidade também foi necessária para a realização dos ensaios não destrutivos.

Figura 25 – Equipamentos utilizados na etapa experimental



a) estufa digital



b) balança digital



c) medidor de umidade de madeiras com agulhas (DL 822)



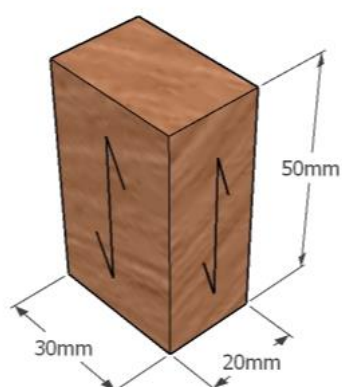
d) paquímetro digital

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para realização dos ensaios desta pesquisa, foram retirados, do lote de madeira, 15 (quinze) corpos de prova com seções de 2 cm x 3 cm x 5 cm. Destaca-se que a quantidade mínima representativa para espécies pouco conhecidas, de acordo com a norma brasileira, é de 12 corpos de prova. Utiliza-se a designação “espécie pouco conhecida” em referência às que não estejam catalogadas no Anexo E da ABNT NBR 7190 (1997).

Na Figura 26, estão as dimensões dos corpos de prova para realização da caracterização física.

Figura 26– Realização do ensaio de umidade e densidade



- a) dimensões dos corpos de prova b) aferição das massas com balança digital

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 7190 (ABNT, 1997).

Os ensaios de características físicas de umidade e de densidade foram realizados, segundo as recomendações da NBR7190 (ABNT, 1997), com corpos de prova de dimensões 2 cm x 3 cm x 5 cm. A massa inicial (m_i) dos corpos de prova foi determinada com a balança digital; em seguida, foram colocados na estufa, à temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para a definição da massa seca, os corpos de prova foram pesados em intervalos de 6 horas, até ocorrer uma variação de massa igual ou inferior a 0,5% em relação à medição anterior. Conhecida a massa seca, determinou-se o teor de umidade da madeira, pela equação (12).

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (12)$$

U (%) – a umidade à base seca

m_i – massa inicial da madeira (g)

m_s – massa da madeira seca (g).

Após a aferição dos pesos secos, os corpos de prova foram submetidos à saturação, e, de maneira inversa, foram aferidas as massas dos corpos de prova de 6 em 6 horas, até se obter uma variação menor do que 0,5%. A densidade básica é a relação entre a massa seca e o volume saturado, expressa na equação (13).

$$\rho_{bas} = m_s / v_{sat} \quad (13)$$

ρ_{bas} – densidade básica (kg/m³)

m_s – massa seca (kg)

v_{sat} – volume saturado (m³).

4.2.5 Ensaio de caracterização das propriedades mecânicas da madeira

Para determinar as características mecânicas, foram considerados os ensaios de compressão paralela às fibras, de compressão normal às fibras, de cisalhamento paralelo às fibras e de flexão. Os ensaios foram realizados conforme os procedimentos da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Os ensaios destrutivos dos corpos de prova foram feitos nos equipamentos descritos a seguir e apresentados na Figura 27.

- Máquina universal Instron 1000HDX – ensaio de flexão estática e compressão normal às fibras.
- Prensa Hidráulica HD-120T – cisalhamento paralelo às fibras.
- Prensa eletrohidráulica analógica WPM 30t – compressão paralela às fibras.
- Máquina universal Emic 23-200 – flexão nas cavilhas e resistência das ligações.

Figura 27 – Máquinas de ensaio utilizadas nos ensaios destrutivos



a) máquina universal Instron 1000HDX



a) prensa Hidráulica HD-120T



b) prensa eletrohidraulica analógica WPM 30t



d) máquina universal Emic 23-200

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os ensaios de caracterização da maçaranduba, foram estimadas as resistências características de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), com a utilização da equação (14).

$$f_k = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n-1}{2}}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (14)$$

f_k – valor característico

n – número total de ensaios

Para o cálculo, os valores das resistências são dispostos do menor para o maior ($f_1 < f_2 \dots < f_n$). Caso a quantidade de valores seja ímpar, o maior valor deve ser desconsiderado. Além disso, a norma especifica que a resistência característica é ou o maior valor entre f_k, f_1 ou 0,7 do valor médio de todos os resultados.

Os ensaios podem ser realizados em corpos de prova com teor de umidade diferente de 12%, que é a condição-padrão de referência, para, em seguida, serem corrigidos pela expressão apresentada na equação (19).

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3 (U\% - 12)}{100} \right] \quad (19)$$

f_{12} é a resistência da madeira na condição-padrão de referência a 12% de umidade, ao passo que $f_{U\%}$ é a resistência medida diretamente do ensaio com teor de umidade diferente de 12%. Essa expressão tem validade para teores de umidade entre $10\% \leq U\% \leq 20\%$. No caso de valores maiores do que 20%, considera-se, na expressão, $U=20\%$, pois a variação não é significativa.

Essa mesma expressão de correção de valores para a condição padrão de referência também pode ser empregada para a correção da rigidez medida experimentalmente em corpos de prova com teores diferentes de 12%. Para isso, deve-se empregar a versão dada na equação (15).

$$E_{12} = E_{U\%} \left[1 + \frac{2 (U\% - 12)}{100} \right] \quad (15)$$

E_{12} é o valor médio do módulo de elasticidade da compressão paralela às fibras, determinado, experimentalmente, em corpos de prova com teores diferentes da condição padrão de referência (12%). Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente. Considera-se desprezível a influência da temperatura na faixa usual de utilização de 10° C a 60° C.

4.2.5.1 Ensaio de compressão paralela às fibras

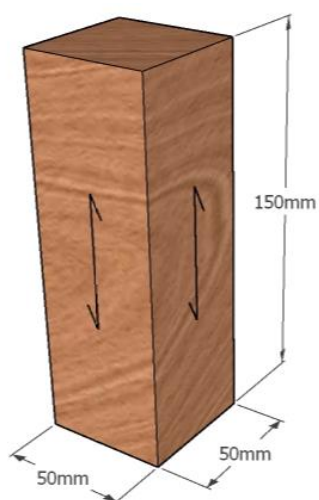
Este ensaio determinou a resistência e a rigidez à compressão paralela às fibras. A norma preconiza a caracterização simplificada para as propriedades de madeiras de espécie usuais. A caracterização é realizada a partir de ensaios de compressão paralela às fibras, constituindo-se, assim, como um dos principais ensaios de resistência mecânica na classificação da madeira para fins estruturais.

Foram ensaiados 15 corpos de prova prismáticos na dimensão proposta pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997) (5,0 cm x 5,0 cm x 15,0 cm).

A

Figura 28 ilustra o modelo com as dimensões recomendadas pela norma.

Figura 28 – Detalhe dos corpos de prova de ensaio de compressão paralela às fibras
a) dimensões do corpo de prova b) execução do ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor (2019) com base na NBR 7190 (ABNT, 1997).

O ensaio foi realizado em uma máquina universal, e o procedimento de carregamento dos corpos de prova foi conduzido segundo as prescrições contidas na norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.2.5.2 Ensaio de Compressão Normal às Fibras

Este ensaio teve, como objetivo, determinar a resistência e a rigidez à compressão normal às fibras. A determinação da resistência à compressão normal às fibras é, também, condicional para o cálculo da resistência ao embutimento da madeira, como foi visto no item 2.3.1. Trata-se de um parâmetro de grande importância para o projeto estrutural de ligações com elementos de madeira.

Foram ensaiados 15 corpos de prova prismáticos na dimensão proposta pela norma NBR 7190 (1997) (5,0 cm x 5,0 cm x 10,0 cm).

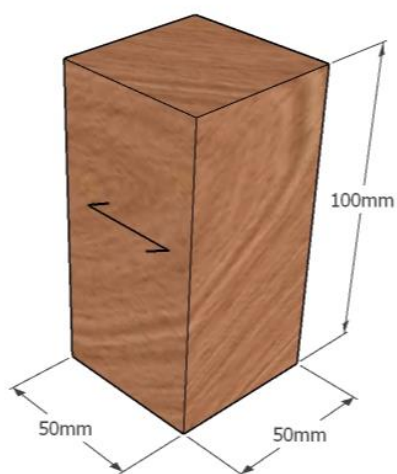
A

Figura 29 ilustra o modelo com as dimensões recomendadas para o ensaio.

Figura 29 – Detalhe do corpo de prova de ensaio de compressão normal às fibras.

a) dimensão do corpo de prova

b) execução do ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor (2019 com base na NBR 7190 (ABNT, 1997)).

O ensaio foi realizado com uma prensa universal (Figura 27 a), e o procedimento de carregamento dos corpos de prova foi conduzido segundo as prescrições contidas na norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.2.5.3 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Tendo em vista a natureza dos carregamentos que incidem na cavilha e os modos de ruptura, considerou-se pertinente a realização dos ensaios de

cisalhamento paralelo às fibras e de flexão estática, ensaios de grande importância para caracterização estrutural da madeira.

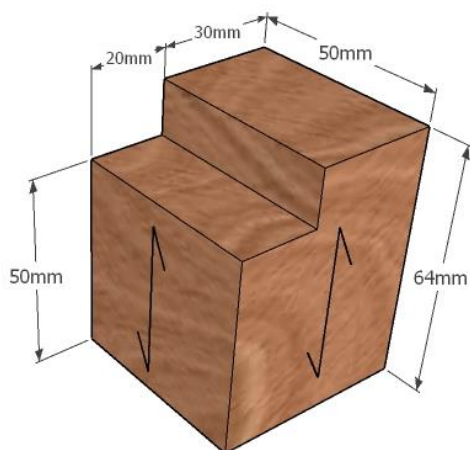
O ensaio de cisalhamento paralelo às fibras tem, como objetivo, determinar a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Foram ensaiados 15 corpos de prova com dimensões propostas pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

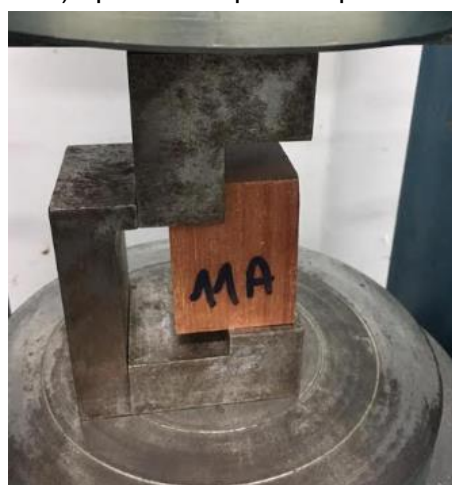
A Figura 30 ilustra o modelo com as dimensões recomendadas.

Figura 30 – Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

a) cisalhamento paralelo às fibras



b) aparato acoplado a prensa



Fonte: Elaborado pelo autor com base na NBR 7190 (ABNT, 1997).

O ensaio de cisalhamento foi feito com a prensa universal (Figura 27 b). Para realização do ensaio, foi necessária a utilização de um aparato (Figura 30 b) que submetesse o corpo de prova à condição de cisalhamento. O procedimento de carregamento dos corpos de prova foi conduzido segundo as prescrições contidas na norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.2.5.4 Ensaio de flexão estática

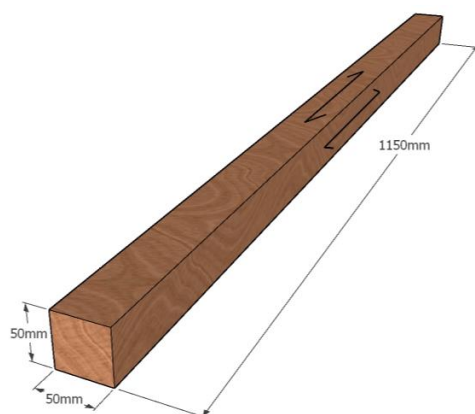
Assim como o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, as propriedades de resistência à flexão da madeira também podem condicionar o desempenho da cavilha na ligação.

Foram ensaiados 15 corpos de prova com dimensões segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

A Figura 31 ilustra o modelo com as dimensões recomendadas pela norma e a foto do ensaio em execução.

Figura 31 – Ensaio de flexão estática

a) dimensões do corpo de prova (NBR 7190)



b) execução do ensaio de flexão



Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 7190 (ABNT, 1997).

O ensaio foi realizado com uma prensa universal (Figura 27 a), e o procedimento de carregamento dos corpos de prova foi conduzido segundo as prescrições contidas na norma brasileira NBR 7190 ABNT (1997).

4.2.6 Ensaio não destrutivo – propagação de ondas sonoras

Neste ensaio, foi possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico da madeira, considerando todos os defeitos de formação presentes nas peças, aproximando-se dos valores de utilização da peça. Na avaliação dos parâmetros de qualidade da madeira, este ensaio é atrativo devido à rapidez e à praticidade dos testes, possibilitando a comparação posterior com os demais métodos propostos.

Para este ensaio, usam-se, como referência, os métodos propostos na NBR 15521 (ABNT, 2007). O equipamento de ultrassom utilizado (Figura 32) está disponível no Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais (Le-dMa/UFBA).

Figura 32 – Aparelho de ultrassom utilizado no ensaio não destrutivo

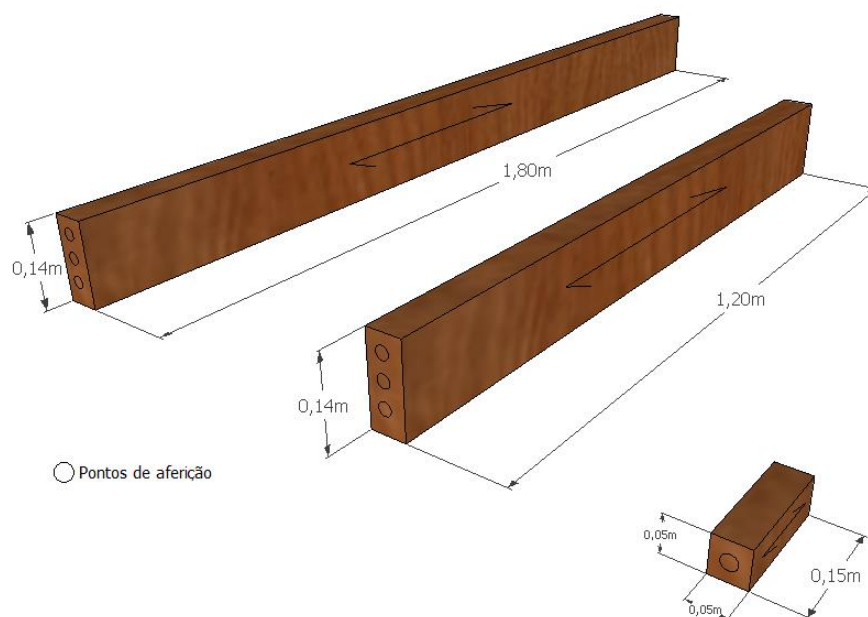


Fonte: Elaborada pelo autor.

A determinação do módulo de elasticidade por ultrassom foi feita, inicialmente, na peça inteira, de 300 cm, sem corte. Em seguida, foi aferida a elasticidade de corpos de prova confeccionados para os ensaios mecânicos. Dessa forma, pretendeu-se comparar os resultados, utilizando diferentes comprimentos de peças e permitindo a avaliação a influência dos defeitos da madeira.

A Figura 33 ilustra as diferentes dimensões utilizadas para o ensaio de propagação de ondas e os respectivos pontos de aferição das velocidades ultrasônicas.

Figura 33 – Dimensões das peças de madeira para o utilizadas para o ensaio não destrutivo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi utilizado o aparelho de ultrassom Proceq, com resolução de 0,1 μ s, com transdutores de face plana e com frequência de 500 kHz. Para a realização da leitura do tempo de percurso do pulso ultrassônico nos corpos de prova, os transdutores foram posicionados na base e no topo das peças, com o auxílio de um gel utilizado como acoplante. O intuito da medição com esse aparelho é verificar as propriedades de resistência e de elasticidade da madeira por meio de um ensaio não destrutivo.

Segundo a NBR 15521 (Ensaio não destrutivo - Ultra-som - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas) (ABN, 2007), a classificação estabelecida pode ser realizada de três diferentes formas, dependendo da condição de umidade da madeira a ser estudada por meio de um medidor de umidade portátil.

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, a velocidade de propagação das ondas foi encontrada por meio da equação (16). Em seguida, os valores obtidos, somados aos demais parâmetros associados à propriedade da madeira ensaiada, foram inseridos na equação (16).

$$V_{LL} = \frac{L}{t} \quad (16)$$

- V_{LL} – velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal
- L – comprimento do percurso
- t – tempo de propagação das ondas

$$V_{LLsat} = -1745 + V_{LL} + 16 \times U + \rho_{ap} \quad (17)$$

V_{LLsat} – valor numérico da velocidade na peça saturada, com teor de umidade maior do que 30 %, expresso em metros por segundo (m/s)

V_{LL} – valor numérico da velocidade na peça com teor de umidade entre 12 % e 30 %, expresso em metros por segundo (m/s)

U – valor numérico do teor de umidade da viga, expresso em porcentagem (%)

pap – valor numérico da densidade aparente da viga na umidade U %, expresso em quilogramas por metro cúbico (kg/m³).

Após os resultados de V_{LLsat} para cada corpo de prova ensaiado serem obtidos, a madeira foi enquadrada de acordo com as classes de resistência presentes na Tabela 4, da NBR 15521 (ABNT, 2007).

Tabela 4 – Classificação por ultrassom da madeira de dicotiledônea (UD)

Classe	V_{LLsat} (m/s)	$C_{LL\ 12\ %}$ (MPa)	$E_{M\ 12\ %}$ (MPa)	$f_{c0,k12\ %}$ (MPa)	$E_{c0,m12\ %}$ (MPa)
UD-20	$V_{LLsat} < 3\ 040$	$< 10\ 620$	$< 6\ 750$	20	8\ 000
UD-25	3040 – 3690	10620 – 13000	6750 – 10420	25	12000
UD-30	3690 – 3950	13000 – 15400	10420 – 13020	30	14000
UD-35	3950 – 4140	15400 – 17800	13020 – 14920	35	15000
UD-40	4140 – 4300	17800 – 20\ 150	14920 – 16520	40	16500
UD-45	4300 – 4390	20150 – 22500	16520 – 17420	45	18500
UD-50	4390 – 4490	22500 – 24900	17420 – 18420	50	19500
UD-55	4490 – 4600	24900 – 27300	18420 – 19120	55	20500
UD-60	$V_{LL\ sat} > 4600$	$> 27\ 300$	$EM > 19120$	60	21200

Fonte: NBR 15521 (ABNT, 2007).

As classes de resistência encontradas para o ensaio de ultrassom foram posteriormente comparadas entre si (classificação obtida a partir dos diferentes comprimentos das peças) e com os resultados obtidos por meio dos ensaios destrutivos.

4.2.7 Ensaio de flexão nas cavilhas

O procedimento de ensaio de flexão nas cavilhas é executado por meio do método do ensaio de flexão em três pontos.

Ao todo, foram confeccionados 117 corpos de prova para o ensaio de flexão em cavilhas. Os corpos de prova de 16 mm, de 18mm e de 20 mm foram divididos em diferentes grupos: com uma camada de reforço, com duas camadas de reforço e sem reforço.

Foram comparados os valores das respectivas resistências dos corpos de prova reforçados e não reforçados, a fim de testar a eficiência do tipo de reforço proposto e a influência do número de camadas no reforço; e, também, de

verificar a porcentagem de aumento na resistência à flexão das cavilhas de madeira reforçadas com fibra de carbono.

A Figura 34 apresenta detalhes dos corpos de prova que foram produzidos para este ensaio.

Figura 34 – Detalhe dos corpos de prova do ensaio de flexão nas cavilhas



Fonte: Elaborada pelo autor.

As cavilhas foram confeccionadas com a madeira de maçaranduba (*Manilkara sp.*), com diâmetro variável (16 mm, 18 mm e 20 mm) e com comprimento de 410 mm. O comprimento escolhido foi adotado para atender a relação $l/h > 21$, para evitar a influência de esforços de cisalhamento, como foi descrito no estudo de Lahr (1983) sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira.

Para viabilização do ensaio, foi preciso acoplar, ao disco da prensa, um perfil tubular de aço de 5 cm de diâmetro e de 15 cm de comprimento. O perfil tubular foi fixado ao disco por dois grampos de metal, também conhecidos como “sargento”. Na Figura 35, é possível observar a adaptação feita para execução do ensaio.

Figura 35 – Execução do ensaio de flexão da cavilha sem reforço



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por meio deste experimento, foram obtidas as cargas máximas de ruptura na flexão das cavilhas. Além disso, foi possível avaliar e comparar a deformação entre as cavilhas reforçadas e não reforçadas. A taxa de incremento adotada no script do ensaio foi de 10 MPa/min.

4.2.8 Ensaio de resistência das ligações

De maneira análoga à da investigação de ligações cavilhadas anteriormente proposta por Gesualdo (1982), por Gomes (1997) e por Pereira e Calil Júnior (2018), a proposta de ensaiar corpos de prova de ligações para ensaio de resistência mecânica tem, como objetivo, analisar o comportamento das cavilhas na ligação a partir de corpos de prova de ligações com cavilhas reforçadas e não reforçadas solicitadas por compressão paralela às fibras e por compressão normal às fibras.

A espessura das peças foi de 5 cm (peça central) e de 2,5 cm (peças externas). Na Figura 36, ilustram-se os modelos com as dimensões dos corpos de prova para os ensaios de compressão paralela e normal às fibras na ligação.

Figura 36 – Dimensões dos corpos de prova do para os ensaios na ligação

a) compressão paralela às fibras na ligação b) compressão normal às fibras na ligação



Fonte: Elaborada pelo autor.

O ensaio foi realizado com a máquina universal de ensaio e com uma taxa de incremento constante, de modo a atender ao intervalo de tempo proposto pela norma, que está entre 10 min e 15 min. A aplicação da carga dos corpos de prova foi contínua, com taxa de incremento constante, levando os corpos de prova à ruptura. O ensaio é interrompido ou com o decréscimo de 20% da carga última ou com um deslizamento de 15 mm.

4.2.9 Análise microestrutural

Para avaliar a aderência da fibra de carbono à madeira e, também, entre as fibras – para a situação em que se utilizou duas camadas de reforço –, foi realizada uma análise microestrutural, por meio de um microscópio de varredura eletrônica (MEV). As amostras foram produzidas por meio de cortes de, aproximadamente, 1 cm na seção transversal da cavilha reforçada. Em seguida, a seção transversal foi dividida em partes menores, para possibilitar a visualização no microscópio.

As imagens de MEV foram obtidas por meio de detecção por elétrons secundários (SE), com tensão de 15kV, no Laboratório do Instituto Federal da Bahia (Departamento de Mecânica), em um equipamento TESCAN, de modelo

VEGA 3 LMU. As superfícies das amostras foram recobertas com, aproximadamente, 20 nm de ouro em um aparelho evaporador desse tipo de metal (*Sputtering – Bal-Tec*). Após esse processo, um feixe de elétrons varre a superfície da amostra, e sua interação com o material analisado gera diversos tipos de sinal, que são utilizados ou para a formação de imagens ou para a análise da composição da amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são discutidos os resultados obtidos nas etapas realizadas. Os resultados da etapa experimental consistem na caracterização físico-mecânica da madeira e das cavilhas reforçadas, abrangendo o ensaio de flexão e de resistência mecânica das ligações.

São apresentados, igualmente, os erros de execução e as dificuldades identificadas durante a elaboração das cavilhas reforçadas com fibra de carbono.

5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA

5.1.1 Propriedades físicas

Neste item, são apresentados os resultados para os ensaios de umidade, de densidade básica e de densidade aparente. Foram realizados de acordo com o método disposto na NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 5 – Resultados dos ensaios da caracterização física da madeira

<i>Estatística</i>	<i>Umidade (%)</i>	<i>Densidade básica (kg/m³)</i>	<i>Densidade aparente 12% (kg/m³)</i>
<i>Média</i>	15,66	954,29	1087,49
<i>Desvio padrão</i>	0,67	26,53	26,57
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	4,26	2,78	2,44
<i>Amostra</i>	15	15	15

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise da Tabela 5, pode-se observar que não houve uma variação significativa para os valores de umidade dos corpos de prova ensaiados. O valor característico do teor de umidade do lote estudado foi de 15,66%. O valor é próximo do valor adotado pela norma brasileira como umidade de referência (12%). Logo, espera-se não encontrar diferença significativa na correção das propriedades físico-mecânicas para o valor referência de umidade.

Os demais valores característicos para os ensaios de densidade foram de 954,29 kg/cm³, para a densidade básica do lote; e de 1087,49 kg/cm³, para a densidade aparente. Note-se que não há uma dispersão significativa entre os valores que compuseram os valores característicos. Isso é confirmado pelos

baixos valores encontrados para os coeficientes de variação: 2,78%, para o ensaio de densidade básica; e 2,44%, para o ensaio de densidade aparente.

Em comparação com o valor de referência da norma para madeira de maçanduba, foram encontrados valores de densidade muito próximos: de 1087,49 kg/m³, para a madeira estudada; e de 1143,00 kg/m³, como valor de referência, presente no Anexo E da norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

5.1.2 Propriedades mecânicas

Esta seção apresenta, em sequência, os resultados de resistência da madeira obtidos por meio dos ensaios destrutivos e não destrutivos. Para cada ensaio, foi realizada uma tabela com a estatística descritiva dos valores obtidos; e um gráfico do tipo *box-plot*, com o objetivo de avaliar a dispersão dos valores encontrados.

O primeiro ensaio a ser comentado é o de compressão paralela às fibras. Ao todo, foram ensaiados 21 corpos de prova, tendo 15 sido destinados à obtenção da tensão de ruptura (f_{c0}) e 6 corpos de prova utilizados na determinação do módulo de elasticidade (E_{c0}). Na Tabela 6, são apresentados os resultados e a Figura 37 ilustra a dispersão dos dados para os valores de resistência à compressão paralela.

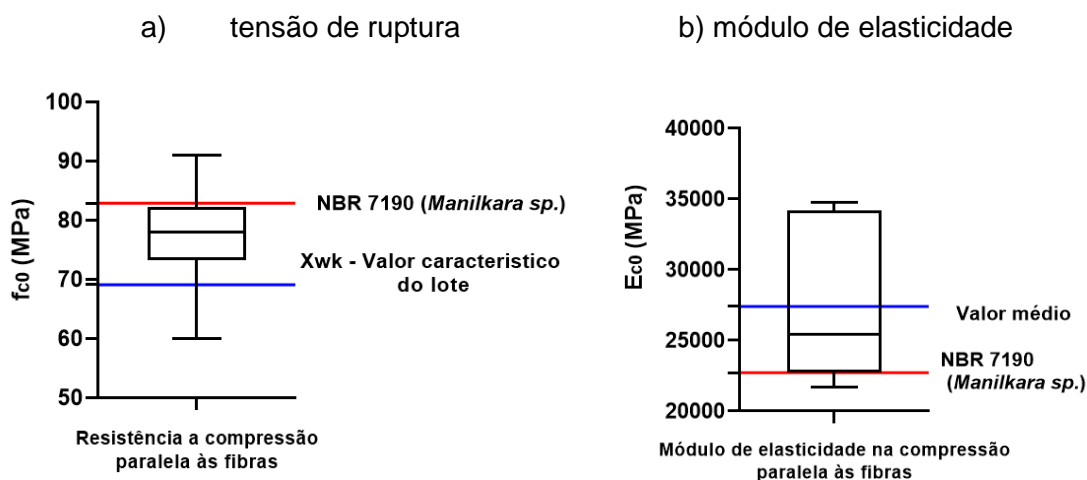
Tabela 6 – Resultados para o ensaio de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}).

<i>Compressão paralela às fibras</i>		
<i>Estatística</i>	<i>f_{c0}</i>	<i>E_{c0}</i>
<i>Média (MPa)</i>	77,14	27413
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	7,86	5656
<i>Mediana (MPa)</i>	77,96	25443
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	10,18	20,63
<i>Valor característico (MPa)</i>	69,10	-
<i>Amostra</i>	15	6

Valores de resistência corrigidos para madeira a 12%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – *Box-plot* – ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar-se a Figura 37, observa-se uma diferença significativa entre o valor de resistência característica do lote e o valor indicado pela norma. Tal diferença pode ser explicada pelo valor mínimo 60,00 MPa, valor inferior mais discrepante. Por meio do tratamento estatístico indicado, o valor característico foi de 69,10 MPa, que é menor do que o valor médio (77,14 MPa). Ainda assim, o valor característico aponta que a madeira pode ser enquadrada na Classe C60. Quanto ao módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão paralela às fibras, o valor médio encontrado foi maior do que o da classe C60.

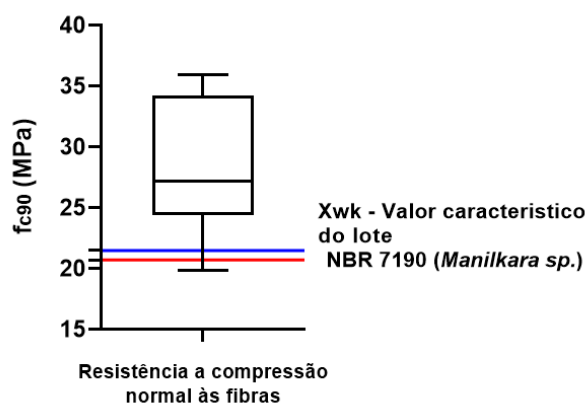
Na Tabela 7, estão contidos os resultados obtidos para o ensaio de compressão normal às fibras, o passo que a Figura 38 ilustra a dispersão dos dados encontrados para os valores de resistência à compressão normal.

Tabela 7 – Resultados para o ensaio de resistência a compressão normal às fibras

<i>Compressão normal às fibras</i>	
Estatística	fc90
<i>Média (MPa)</i>	28,25
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	5,59
<i>Mediana (MPa)</i>	27,20
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	19,80
<i>Valor característico (MPa)</i>	21,49
<i>Amostra</i>	15

Valores de resistência corrigidos para madeira a 12%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – *Box-plot* – Ensaio de compressão normal às fibras

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como se pode observar, o valor característico da resistência à compressão normal às fibras da madeira estudada foi muito próximo ao valor calculado a partir do método indicado pela NBR 7190 (ABNT, 1997), apresentando valores de 21,49 MPa e 20,73 MPa, respectivamente. Os valores obtidos demonstraram uma considerável dispersão, destacada no coeficiente de variação de 19,80%, tanto na Tabela 7 quanto no *box-plot* da Figura 38.

A Tabela 8 e a Tabela 9 contêm os resultados para os ensaios de cisalhamento paralelo às fibras e de flexão estática. Na Figura 39 e na Figura 40, encontram-se os respectivos gráficos *box-plot*, em que pode ser observada a dispersão dos resultados encontrados.

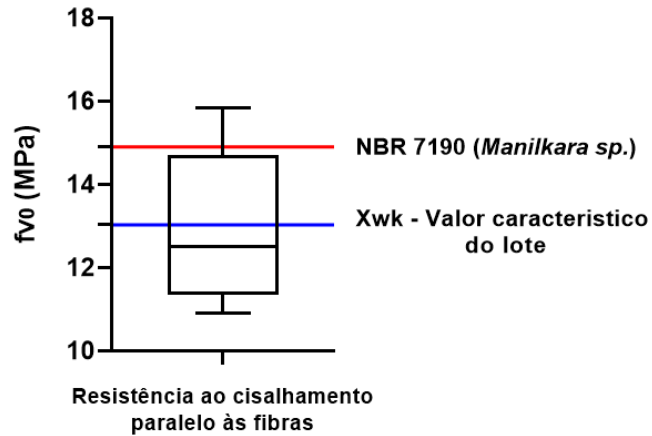
Tabela 8 – Resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

<i>Cisalhamento paralelo às fibras</i>	
Estatística	<i>f_{v0}</i>
<i>Média (MPa)</i>	13,03
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,83
<i>Mediana (MPa)</i>	12,51
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	14,02
<i>Valor característico (MPa)</i>	11,06
<i>Amostra</i>	15

Valores de resistência corrigidos para madeira a 12%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – *Box-plot* – ensaio de cisalhamento paralelo às fibras



Fonte: Elaborada pelo autor.

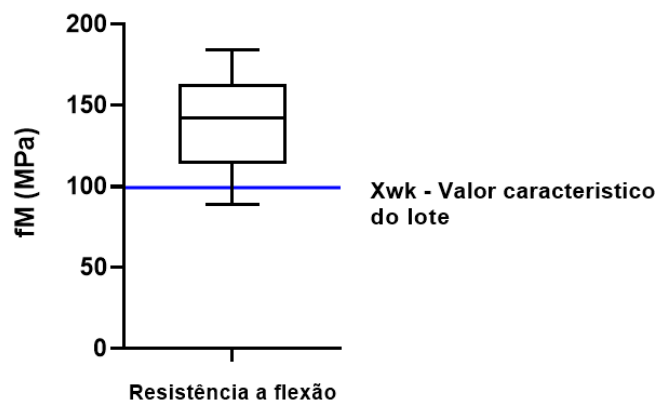
Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência a flexão estática

<i>Flexão Estática</i>	
Estatística	MOR
<i>Média (MPa)</i>	136,97
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	29,70
<i>Mediana (MPa)</i>	141,73
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	2,78
<i>Valor característico (MPa)</i>	99,06
<i>Amostra</i>	15

Valores de resistência corrigidos para madeira a 12%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – *Box-plot* – Flexão estática



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor obtido para estes ensaios condicionam o desempenho das cavilhas fabricadas com a espécie de *Manilkara* estudada. Quanto à resistência à flexão, a norma brasileira não dispõe de valores para este tipo de ensaio para as madeiras presentes no Anexo E.

Em relação aos valores de resistência obtidos, foram encontrados valores de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras muito próximos ao que é disposto na norma para madeira de maçaranduba. Um resumo com a comparação dos valores está na Tabela 10. Quando não foi possível caracterizar o lote de maneira completa, foram utilizadas as relações $f_{t0} = \frac{f_{c0}}{0,77}$ e $f_{c90} = 0,25 \cdot f_{c0}$, presentes na norma brasileira e utilizadas na estimativa das propriedades de resistência.

Tabela 10 – Comparação entre os valores das propriedades mecânicas das madeiras de maçaranduba

Propriedade das madeiras	$\rho_{ap\ 12\%}$ (kg/m^3)	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{c90,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)
<i>Maçaranduba ensaiada</i>	1087,49	69,10	21,49	89,74	11,06	27413
<i>Maçaranduba NBR 7190</i>	1143,00	82,90	20,73	138,5	14,90	22733

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 7190 (ABNT, 1997).

No caso da densidade e da compressão normal às fibras, os valores obtidos foram similares aos previstos na norma para madeira de maçaranduba. Entretanto, em comparação com os valores encontrados, percebe-se que a madeira utilizada na pesquisa obteve valores mais baixos de compressão normal e de compressão paralela às fibras, que determinaram, também, um menor valor para propriedade de resistência à tração.

Na comparação, pode-se observar a divergência dos valores para o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras. O valor para o lote da maçaranduba estudada foi 20,6% maior do que o da norma brasileira. A partir disso, infere-se que o conector produzido com a maçaranduba estudada tem um caráter mais rígido, podendo resultar em menores valores de deformação para as ligações cavilhadas.

5.1.2.1 Ensaio não destrutivo - propagação de ondas sonoras

Conforme foi descrito anteriormente, antes do rompimento dos corpos de prova, foi feito um ensaio não destrutivo, com aparelho de ultrassom. O objetivo do ensaio foi determinar o tempo de propagação da onda ultrassônica nas toras, para a obtenção do seu módulo de elasticidade dinâmico.

A NBR 15521 (ABNT, 2007) apresenta equações para determinação da velocidade de propagação das ondas e, a partir desse resultado, propõe uma classificação da madeira com base na velocidade medida. Essa norma, entretanto, foi elaborada para aplicação em madeiras serradas, e a relação representada na tabela de classificação das madeiras foi elaborada por meio de ensaios com madeiras adultas e de espécies com densidade aparente de 450 Kg/m³ a 100 kg/m³.

Na Tabela 11, estão os resultados do ensaio não destrutivo, considerando os três comprimentos analisados.

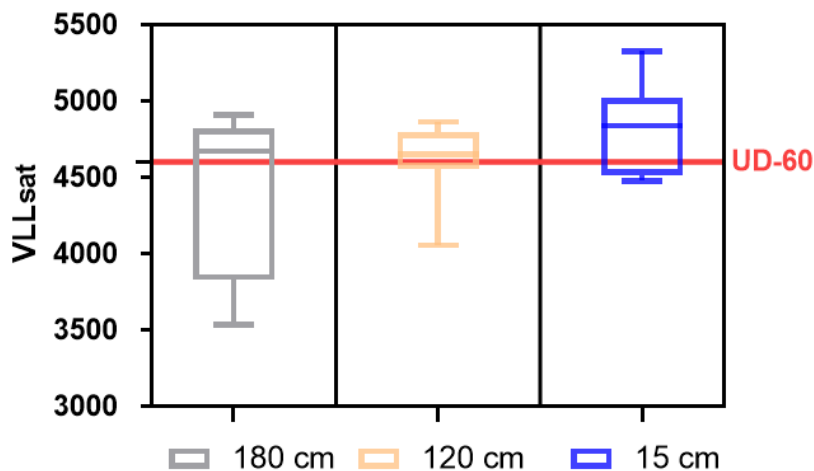
A Figura 41 ilustra a dispersão dos dados obtidos.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de propagação de ondas sonoras

Estatística descritiva	Ensaio de propagação de ondas sonoras		
	Seção 14,5 x 5 cm		Seção 5x5 cm
	Comprimento		
	180 cm	120 cm	15 cm
VLL int–valor médio	4637,6	4876,5	5071,8
VLLsat–valor médio	4366,0	4604,9	4800,2
Desvio padrão	533,6	264,7	255,1
Coefficiente de variação	12%	6%	5%
Classificação UD	UD-45	UD-60	UD-60
Quantidade de amostras	15	15	15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – *Box-plot* da distribuição das classes de resistência obtidas por ensaios não destrutivos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 11, observa-se que os valores obtidos para velocidade de propagação de ondas de ultrassom na direção longitudinal às fibras – denominado VLLsat – aumentaram à medida que se reduziu o comprimento dos corpos de provas ensaiados. Essa redução acarretou, também, menor dispersão dos valores obtidos, como se pode verificar nos valores dos coeficientes de variação (12%, 6% e 5%) para os respectivos comprimentos (1,80 m, 1,20 m e 0,15 m).

Ao comparar-se a classificação dos diferentes comprimentos, percebe-se que os corpos de prova com 1,80 m de comprimento apresentaram valores inferiores para o VLLsat, sendo enquadrados na classe UD-45, de acordo com a classificação da NBR 15521 (ABNT, 2007). Entretanto, considerando que, a partir do comprimento de 1,20 m, a madeira estudada é classificada de maneira a possibilitar a execução das cavilhas (Classe C60); e considerando, ainda, que o comprimento médio das cavilhas utilizadas nas estruturas é consideravelmente menor do que 1,20 m, tendo sido adotada a classe de resistência da classificação da NBR 15521 (ABNT, 2007) – ou seja, classe UD-60 –, a madeira estaria apta para ser destinada à fabricação de conectores estruturais. O fato de os corpos de prova com 180 cm alcançarem valores inferiores para o VLLsat pode ser atribuído à existência de defeitos internos e de mudanças na direção das fibras, que se reduzem conforme a madeira for serrada.

Apesar dos valores mais baixos encontrados na medição das peças maiores, a média do VLLsat, para as três situações testadas, desconsiderando os

valores discrepantes, alcançou valores acima de 4600 m/s, valor mínimo que classificaria a madeira como UD-60. Isso indica valores de resistência à compressão paralela às fibras a 12% de umidade (f_{c0} 12%) iguais a 60 MPa, de acordo com o que dispõe a NBR 15521 (ABNT, 2007).

Com base nos valores obtidos pela caracterização mecânica por meio do ensaio destrutivo, a madeira de maçaranduba estudada foi classificada como sendo de uso estrutural na classe de resistência C60, segundo a normatização técnica.

Os métodos não destrutivos de propagação de ondas ultrassônicas tiveram boa estimativa da resistência à compressão paralela às fibras. A menor dispersão nos resultados foi encontrada nas peças de menores comprimentos.

5.2 AVALIAÇÃO DAS CAVILHAS REFORÇADAS

5.2.1 Ensaio de flexão das cavilhas

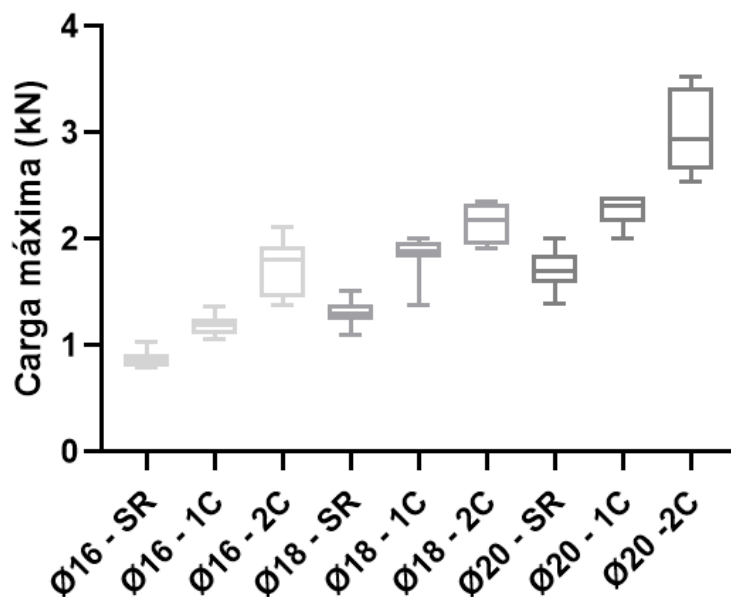
O ensaio de flexão das cavilhas foi considerado os diferentes diâmetros (16 mm, 18 mm e 20 mm) e as duas situações de reforço (uma e duas camadas de fibra de carbono). Foram formados grupos com 12 cavilhas para cada diâmetro e para cada tipo de reforço, totalizando 36 cavilhas. Os resultados estão na Tabela 12. No gráfico da Figura 42, é possível observar a diferença dos resultados para a condição de reforço analisada.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de flexão das cavilhas

Estatística descritiva	Ø16 mm			Ø18 mm			Ø20 mm		
	SR	1C	2C	SR	1C	2C	SR	1C	2C
Valor médio (kN)	0,87	1,20	1,74	1,31	1,86	2,15	1,71	2,27	2,97
Desvio padrão (kN)	0,07	0,10	0,26	0,11	0,17	0,18	0,18	0,14	0,38
Mediana (kN)	0,86	1,20	1,80	1,30	1,89	2,19	1,70	2,31	2,94
Coefficiente de variação (%)	8,20	8,27	14,90	8,12	8,94	8,53	10,25	5,99	12,86
Quantidade de amostras	12	12	12	12	12	12	12	12	12

SR- sem reforço; 1C – reforço com uma camada; 2C – reforço com duas camadas.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 42 – *Box-plot* para o ensaio de flexão das cavilhas nas cavilhas

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando a média dos resultados obtidos, a partir dos diferentes diâmetros avaliados, observou-se uma resistência maior em todos os conectores que receberam o reforço. Para o reforço de uma camada, há um incremento de, aproximadamente, 38% para as cavilhas de Ø16 mm reforçadas; de 42%, para o diâmetro de Ø18 mm; e de 33%, para o diâmetro de Ø20 mm. Na adição da segunda camada, o incremento foi de 45%, para as cavilhas de Ø16 mm reforçadas; de 16%, para o diâmetro de Ø18 mm; e de 31%, para o diâmetro de Ø20 mm.

O aumento percentual na resistência a tração encontrado por Bravo *et al.* (2020) no reforço de uma peça de maçaranduba com uma camada de tecido de fibra de carbono foi de 64,33%, aumento percentual maior do que o obtido na carga última das cavilhas reforçadas com uma camada.

Para cada adição de uma camada de fibra de carbono e para cada diâmetro, os dados foram separados em dois grupos. Na sequência, foi realizado um teste T com análise bi-caudal, não pareado, com 95% de nível de confiança, para comparar os valores das cargas de ruptura, a fim de verificar se existe diferença significativa entre as cavilhas não reforçadas e as reforçadas com uma camada. Uma diferença estatisticamente significativa foi percebida com a adição de uma

e de duas camadas de fibra de carbono, descartando, portanto, a hipótese nula de igualdade entre as amostras, com $p\text{-valor} < 0,0001$.

Quanto ao modo de ruptura das cavilhas, houve uma variação. Ocorreram dois tipos de ruptura: ruptura na madeira; e ruptura simultânea na fibra de carbono e na madeira.

5.2.2 Resistência das ligações cavilhadas

Por meio do ensaio das ligações, além dos valores de resistência última para cada diâmetro, da condição de reforço e da geometria do corpo de prova, foi mensurado, também, o valor do momento resistente (M_y), de maneira analítica e experimental, para os pinos reforçados e não reforçados. No Eurocode 5 (CEN, 2004) não há disposição sobre uma fórmula empírica que possa ser utilizada para calcular o M_y . Sendo assim, aplicou-se a equação (16), para determinação do momento resistente das cavilhas de madeira de forma analítica. Posteriormente, foi feita uma retroanálise, na qual foi o momento resistente a partir das cargas últimas obtidas nos ensaios experimentais.

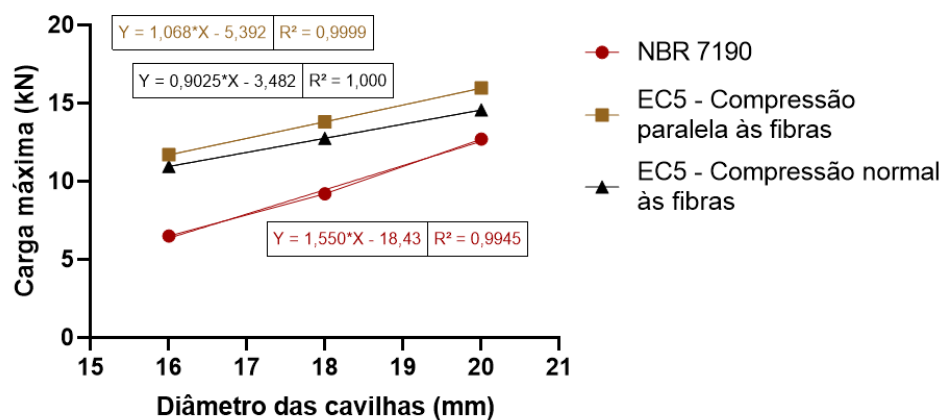
Os valores de resistência da ligação também foram calculados de maneira analítica. Na Tabela 13, está a estimativa da carga máxima (F_{est}) para as ligações com duas cavilhas submetidas a corte duplo. Os valores se baseiam em cálculos preliminares realizados por meio do método da NBR 7190 (item 2.3.1.1) e da sua revisão.

Tabela 13 – Estimativa da carga de rompimento dos corpos de prova para o ensaio de ligação

Diâmetro da cavilha na ligação	Carga máxima estimada (Método da NBR 7190)	Carga máxima estimada (Método do Eurocode 5 + Equação 16)	
		Compressão paralela às fibras	Compressão normal às fibras
16 mm	6,50 kN	11,70 kN	10,96 kN
18 mm	9,20 kN	13,80 kN	12,76 kN
20 mm	12,70 kN	15,97 kN	14,57 kN

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 – Comportamento das ligações pelas equações de regressão linear.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por meio do cálculo da resistência estimada por ambos os métodos, observa-se um aumento da carga máxima com o aumento do diâmetro das cavilhas empregadas. O método do EC5 para as situações de compressão paralela e normal às fibras conduziu a valores de carga última mais altos do que os obtidos por meio do método da norma vigente.

Para as duas situações de dimensionamento, foi encontrada uma boa aderência das equações aos valores obtidos, o que foi confirmado pelos elevados valores do coeficiente de determinação.

Quanto aos critérios normativos referentes ao dimensionamento das ligações estruturais com peças de madeiras, não há diferença entre o método de cálculo para as distintas direções das peças que compõem o corpo de prova. No entanto, observou-se uma diferença significativa na resistência da ligação para as diferentes situações avaliadas. Os corpos de prova ensaiados na situação normal às fibras tiveram valores de resistência última mais baixos do que os submetidos à condição paralela às fibras.

Os valores das cargas de ruptura, de momento resistente das cavilhas e de momento resistente de cálculo são apresentadas na Tabela 14, para ligações submetidas à compressão normal às fibras; e na Tabela 15, para ligações submetidas à compressão paralela às fibras. Foi adicionada às tabelas uma coluna à direita, que é utilizada como parâmetro para a diferença entre os valores obtidos pelos dois métodos.

Para o cálculo do momento resistente da cavilha, foi considerado o aumento do diâmetro ocasionado pela camada de fibra de carbono. Cada camada resulta no aumento de 0,8 mm no diâmetro da cavilha. Avaliou-se a carga de ruptura média das ligações para a retroanálise do M_y em cada condição analisada.

Tabela 14 – Carga de ruptura e cálculo do momento resistente para ligações submetidas à compressão normal às fibras

<i>Ligações - compressão normal às fibras</i>					
Série	Diâmetro final (mm)	Carga ruptura (N)	M_y - Efetivo (N.mm)	M_y - Analítico (N.mm)	M_{ya}/M_{ye}
16 - SR	16	45047	36873	2490	6,75%
16 - 1C	16,8	51957	47163	2745	5,82%
16 - 2C	17,6	53320	47874	3012	6,29%
18 - SR	18	44393	32605	3151	9,66%
18 - 1C	18,8	56137	50411	3437	6,82%
18 - 2C	19,6	57185	50675	3736	7,37%
20 - SR	20	49017	36670	3890	10,61%
20 - 1C	20,8	63247	59301	4208	7,10%
20 - 2C	21,6	59460	50985	4537	8,90%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 - Carga de ruptura e cálculo do momento resistente para ligações submetidas à compressão paralela às fibras

<i>Ligações - Compressão paralela às fibras</i>					
Série	Diâmetro final (mm)	Carga ruptura (N)	M_y - Efetivo (N.mm)	M_y - Analítico (N.mm)	M_{ya}/M_{ye}
16 - SR	16	47827	41565	2490	5,99%
16 - 1C	16,8	54810	52490	2745	5,23%
16 - 2C	17,6	61565	63822	3012	4,72%
18 - SR	18	69930	80914	3151	3,89%
18 - 1C	18,8	67555	73008	3437	4,71%
18 - 2C	19,6	83085	106975	3736	3,49%
20 - SR	20	78077	93041	3890	4,18%
20 - 1C	20,8	80925	97079	4208	4,33%
20 - 2C	21,6	81597	96012	4537	4,73%

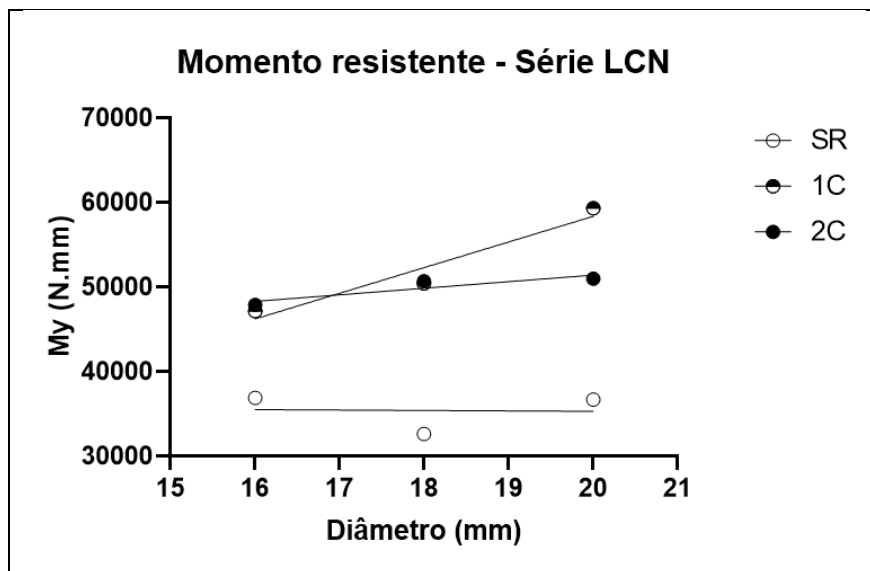
Fonte: Elaborada pelo autor.

O aumento da carga de ruptura média foi observado à medida que foram adicionadas as camadas de fibra de carbono às cavilhas. Foi notada, também, uma grande diferença entre os valores obtidos com o método analítico e com o método experimental. O método analítico proposto pela norma ABNT NBR 7190 (1997) resultou em valores mais baixos do que os do método do Eurocode 5 combinado com a equação proposta por Johansen para o cálculo do M_y (equação 15).

Teodorescu *et al.* (2020) afirmam que há uma falta significativa de diretrizes para prever o comportamento e a capacidade de carga para ligações com cavilhas de madeira. Na avaliação do momento resistente para cavilha de maçaranduba com 12 mm, os autores encontraram um valor de momento resistente de $M_y = 40050$ Nmm.

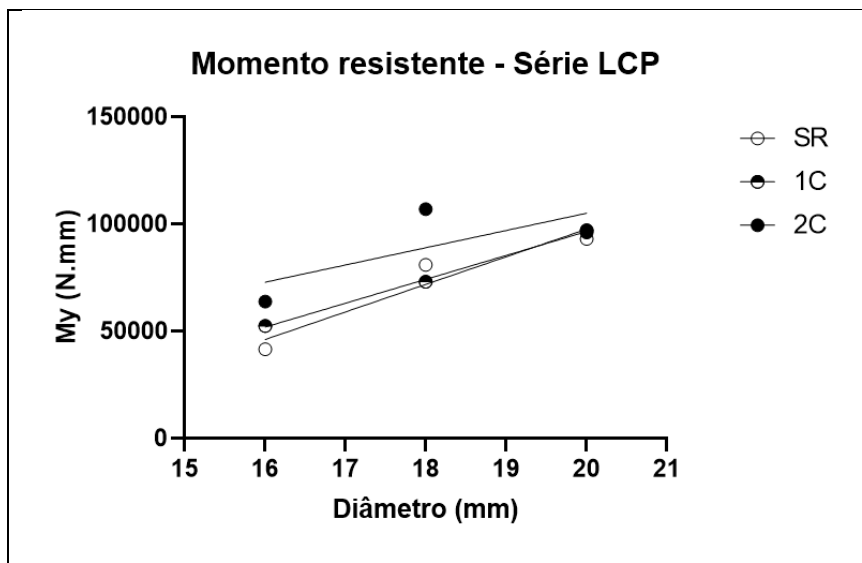
A Figura 43 e Figura 44 contêm os gráficos de regressão linear das ligações nas duas direções analisadas: compressão normal (LCN) e paralela às fibras (LCP), sujeitas às três condições de reforço analisadas – sem reforço (SR), com uma camada (1C) e com duas camadas (2C).

Figura 43 – Gráfico de regressão linear para a série submetida à compressão normal às fibras.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 – Gráfico de regressão linear para a série submetida à compressão paralela às fibras.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Equações da regressão linear para o momento resistente das cavilhas

<i>Série LCN</i>		
SR	$Y = -50,75 * X + 36296$	$R^2 = 0,0017$
1C	$Y = 3035 * X - 2329$	$R^2 = 0,9328$
2C	$Y = 777,8 * X + 35845$	$R^2 = 0,8239$
<i>Série LCP</i>		
SR	$Y = 12869 * X - 159802$	$R^2 = 0,9147$
1C	$Y = 11147 * X - 126458$	$R^2 = 0,9979$
2C	$Y = 8048 * X - 55919$	$R^2 = 0,5149$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por meio da interpretação dos gráficos e das equações de regressão apresentadas, considerando os diâmetros avaliados, as equações para as séries reforçadas retornaram valores para o momento resistente das cavilhas maiores do que as da série não reforçada. No entanto, a menor diferença observada para os corpos de prova submetidos à compressão normal às fibras pode ser justificada pelo seu modo de ruptura, em que predominou a falha pelo cisalhamento da madeira que ocorreu na direção da linha dos furos.

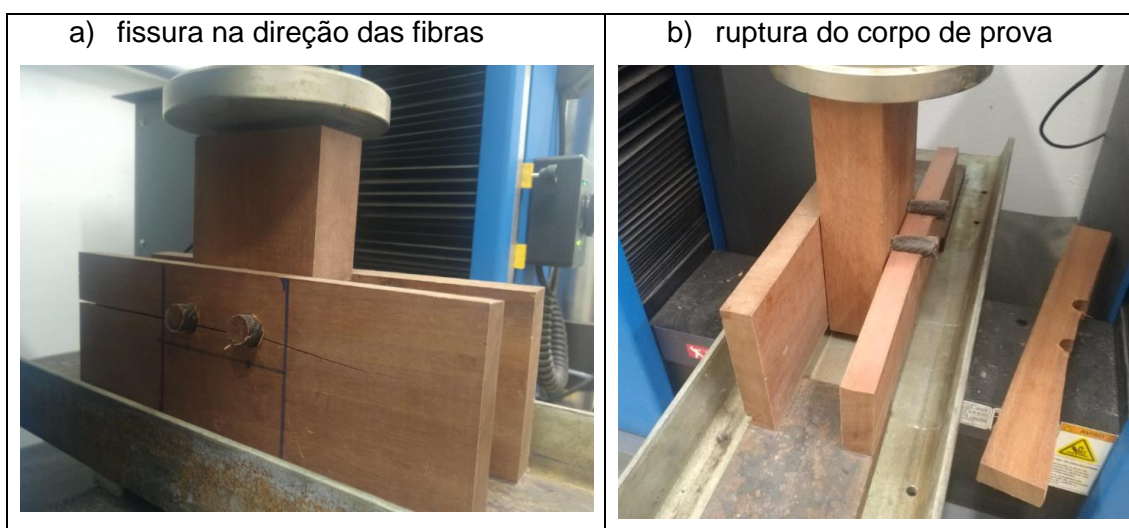
Tanto a série não reforçada, na condição de compressão normal às fibras, quanto a série reforçada com duas camadas, na condição paralela às fibras, alcançaram valores não lineares para os diâmetros de 16 mm, 18 mm e 20 mm, visto que o momento resistente dos pinos não foi proporcional ao aumento do

diâmetro. Tal hipótese é confirmada pelo baixo valor encontrado para o coeficiente de determinação.

Outro fator relevante a ser analisado é o modo de ruptura das ligações. A avaliação da ruptura após a realização dos ensaios nos permite verificar se os modos de falha das ligações são condizentes com os atuais métodos de dimensionamento, cuja resistência é calculada, também, em função do modo de ruptura dos pinos na ligação.

A Figura 45 e a Figura 46 ilustram os modos de ruptura para as ligações submetidas à compressão normal às fibras e à compressão paralela às fibras, respectivamente.

Figura 45 – Ruptura das ligações submetidas a compressão normal às fibras



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 – Ruptura das ligações submetidas a compressão paralela às fibras



Fonte: Elaborada pelo autor.

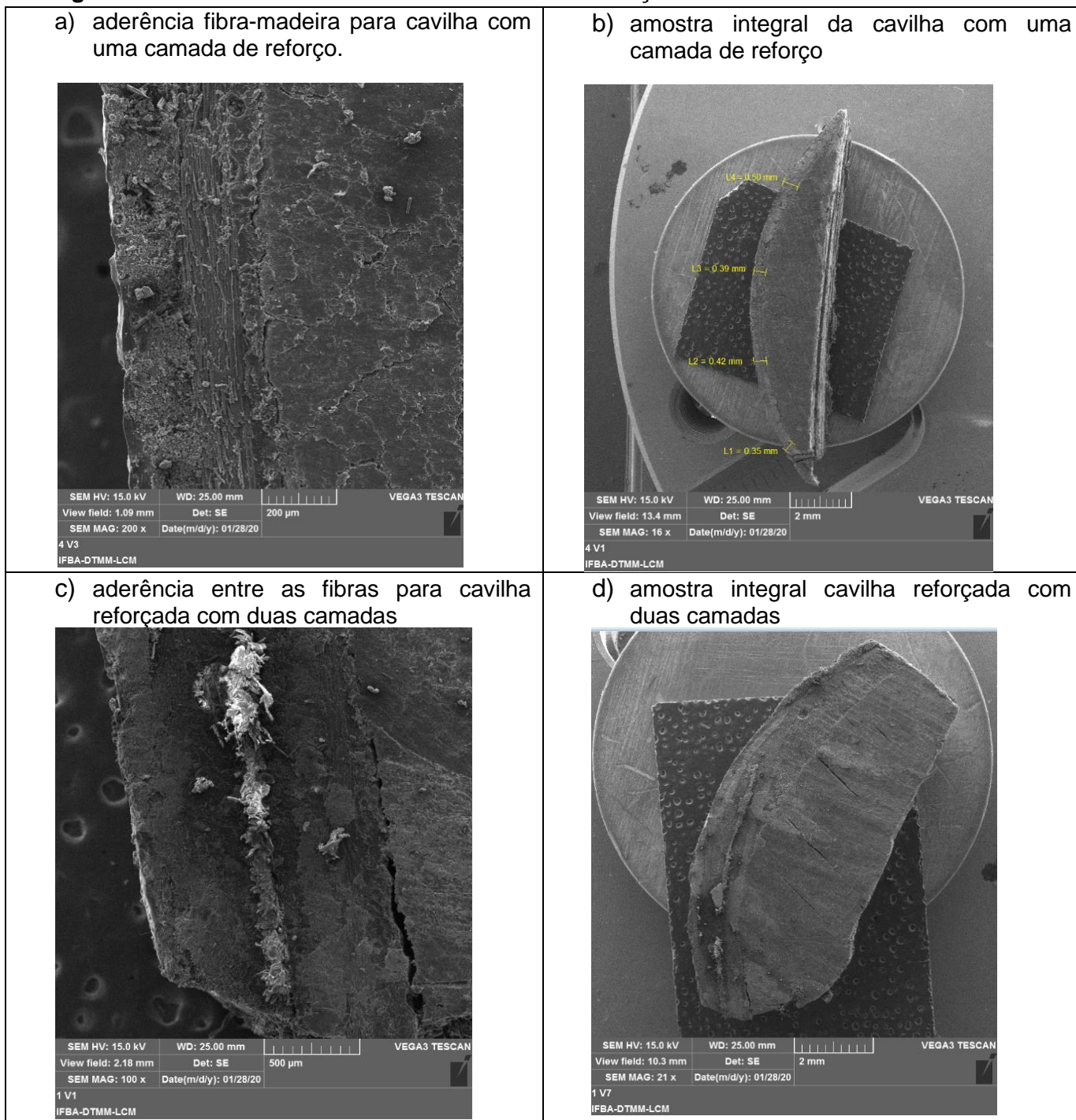
Para ambas as condições de ligação entre as peças, o modo de ruptura foi semelhante, com uma linha de ruptura na direção das fibras com fissura próxima ao eixo dos furos, similar ao modo de ruptura 1, estudado pelo modelo de Johansen.

Para a série submetida à compressão paralela às fibras, observou-se, também, a ruptura que ocorreu pela deformação do conector, como está na figura 48a, similar ao modo de ruptura 3 (Figura 11). Essa forma de ruptura, que contém quatro pontos de dobramento das fibras, ocorreu, predominantemente, nas cavilhas de menor diâmetro.

5.2.3 Análise Microestrutural

As imagens obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) são apresentadas na Figura 47.

Figura 47 – Análise Microestrutural das cavilhas reforçadas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se perceber a diferença entre os pontos de interação da fibra com a madeira. Nas medidas indicadas na amostra integral da cavilha com uma camada de reforço, a espessura final da camada de fibra de carbono estava próxima ao valor indicado pelo fabricante, que foi de 0,4 mm.

Houve uma maior interação entre as fibras, sobretudo pela presença da matriz epóxi entre as camadas. Na imagem (c) da Figura 47, existe um ponto de fragilidade na aderência entre a fibra e a madeira. A incidência de defeitos desse tipo prejudica a resistência mecânica do conector, seja pela perda de resistência mecânica, seja pela maior deformação que os conectores com defeito podem provocar na ligação. Tais pontos de falha podem indicar insuficiência de resina; defeitos geométricos na cavilha; e problemas na aderência da fibra durante o processo de laminação. O seccionamento da seção transversal da cavilha retirada para amostra também pode estar relacionado à falha na aderência da fibra e à abertura observada.

5.2.4 Problemas de execução e os aspectos limitantes

Durante o processo de fabricação e de execução dos corpos de prova e das ligações cavilhadas, foram observados pontos considerados oportunidades de melhoria para a fabricação de uma ligação com cavilhas reforçadas.

No Quadro 9, estão listados os problemas encontrados e as possíveis causas associadas.

Quadro 9 – Problemas relativos à fabricação das ligações e as causas associadas

Problema	Causa associada
Tecido (em parte ou no todo) não aderido à madeira	• Proporção adotada na composição da matriz
	• Mistura inadequada entre as fases
Diferenças no diâmetro da cavilha reforçada	• Falta de precisão no corte do tecido
	• Imprecisão durante o torneamento das cavilhas
Danificação na região da fibra	• Danos causados à fibra durante a retirada da fita adesiva

Fonte: Elaborado pelo autor.

As cavilhas com defeito foram descartadas dos ensaios. Esses problemas foram reduzidos à medida que foi adquirida uma maior prática na aplicação do tecido de fibra carbono na cavilha e na retirada da fita adesiva envolvida na fibra na etapa de corte do tecido.

A utilização da resina epóxi para aplicação dos reforços teve desempenho positivo em relação à aderência na madeira. Porém, apesar de a proporção das fases que compõem a matriz epóxi serem aferidas por meio da pesagem, em alguns casos, a mistura entre a resina e o endurecedor não proporcionou à fibra uma adesividade adequada.

A maioria dos problemas encontrados pode ser reduzida com a industrialização ou padronização dos processos: maior precisão no corte do tecido, proporção entre as fases da resina, mistura mais homogênea por métodos mecânicos.

Quanto aos diferentes comprimentos de cavilhas produzidos, a incidência de defeitos foi maior nas cavilhas de maior comprimento. Isso se verificou, pois a laminação das cavilhas destinadas ao ensaio de flexão indicou ser mais trabalhosa e menos precisa, quando foi comparada ao reforço das cavilhas menores. Em relação ao diâmetro, a incidência de defeitos foi maior entre as cavilhas de 16 mm.

6 CONCLUSÕES

Com base nas análises e nas discussões apresentadas são possíveis as seguintes conclusões.

a) A aplicação do método de análise hierárquica dos processos resultou na escolha do tecido de fibra de carbono mais bem avaliado. Esse foi o material mais indicado para o reforço, considerando as características de projeto. O método da AHP se mostrou adequado a estudos que exijam uma tomada de decisão por diferentes sistemas de reforço de madeira com PRF; e oferece a possibilidade de se avaliar, simultaneamente, variáveis qualitativas e quantitativas.

b) Os resultados dos ensaios de caracterização demonstram o desempenho mecânico da espécie de maçaranduba estudada, tendo em vista o atendimento à resistência mecânica da classe C60 de dicotiledôneas. Portanto, é adequada, de acordo com os requisitos da NBR 7190 (ABNT, 1997), à confecção das cavilhas para utilização estrutural.

c) O método utilizado no ensaio não destrutivo rendeu resultados condizentes com os ensaios destrutivos. Tais resultados apontam uma maior resistência mecânica da madeira à medida que o comprimento das peças avaliadas eram reduzidos. Isso pode ser explicado pela diminuição de defeitos conforme as peças diminuem de comprimento e de seção. Em comparação com o método da NBR 7190 (ABNT, 1997), o método aplicado por meio do ensaio não destrutivo classificou a madeira de forma similar, enquadrando a maçaranduba estudada na classe C60.

d) A partir dos resultados dos ensaios de flexão das cavilhas, notou-se que a técnica de reforço –adição de uma camada de fibra de carbono – atribui ao conector circular de madeira um aumento na sua resistência à flexão. Um aumento na carga última foi, também, observado com a adição da segunda camada de reforço. Considerando a variação da carga obtida pelo reforço, os custos de produção e o tempo empregado na aplicação da fibra na cavilha, conclui-se que o reforço com uma camada de PRFC é mais atrativo do que o reforço com duas camadas.

e) Quanto à fabricação do modelo de ligações entre peças estruturais por cavilhas reforçadas, os modelos que foram unidos com as cavilhas reforçadas

com fibra de carbono alcançaram um bom desempenho, com valores de carga última e de momento resistente mais elevados do que a série não reforçada.

f) O momento resistente do conector, calculado de forma analítica, retornou valores que podem ser considerados conservadores para o cálculo das ligações feitas com a cavilha de maçaranduba. Houve uma diferença significativa entre os momentos calculados de maneira analítica e os ensaiados experimentalmente. A diferença foi maior para as ligações submetidas à compressão paralela às fibras, cuja carga última foi mais elevada.

g) Quanto ao momento resistente das cavilhas reforçadas, o procedimento adotado retornou valores mais altos para a série das cavilhas reforçadas. A adição de uma segunda camada atribuiu ao conector um aumento do momento resistente, quando é comparado com os da série reforçada por uma única camada.

h) Apesar de o método de dimensionamento proposto pela NBR 7190 para ligações cavilhadas não diferenciar os métodos de cálculo para as ligações com peças carregadas em diferentes direções, nas situações avaliadas com corpos de provas submetidos a ligações normais e paralelas às fibras, as ligações submetidas à condição normal às fibras obtiveram menores valores de resistência última.

A execução de ligações com o sistema cavilhado implica uma alternativa de construção eficiente em relação aos sistemas em que predominam os conectores metálicos. Com o aproveitamento das cavilhas reforçadas na ligação, espera-se continuar a investigação das ligações com cavilhas e da técnica proposta, de modo a avaliar a sua durabilidade e a sua viabilidade de industrialização na produção.

Os parâmetros de resistência aqui apresentados para as cavilhas reforçadas e não reforçadas podem ser aproveitados pelo setor de engenharia, de arquitetura e de construção civil como uma possibilidade viável para ligação entre peças de madeira.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As ligações cavilhadas e as madeiras reforçadas com fibras e com resina polimérica têm um elevado potencial, sobretudo pela resistência mecânica. Para o aperfeiçoamento da técnica, contínuas pesquisas são importantes. Do

universo de estudos que ainda precisam ser desenvolvidos e aprofundados, sugerem-se os seguintes:

- avaliação da influência do reforço para cavilhas de madeiras provenientes de árvores coníferas;
- comparação do reforço por meio da aplicação de diferentes tipos de fibras, considerando o seu material de composição e a direção das fibras;
- comparação da laminação da fibra por meio dos diferentes tipos de resina, considerando as diferentes proporções entre os componentes;
- aplicação de novos métodos de laminação das cavilhas, de modo a melhorar o processo atual e a reduzir os defeitos.

Mais trabalhos devem ser realizados, com o intuito de investigar a adequação dos novos parâmetros da revisão da norma, que é baseada em padrões europeus, a diferentes geometrias de ligação, diâmetros das cavilhas e classes e espécies de madeira.

REFERÊNCIA

ALMEIDA, F. A. L. **A Madeira como material estrutural: projeto da estrutura da cobertura de um edifício**. 2012. 310 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/72613/1/000155383.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

ANCELOTTI JUNIOR, A. C. **Efeitos da porosidade na resistencia ao cisalhamento e nas propriedades dinamicas de compostos de fibra de carbono/resina epoxi**. 2006. Dissertação (Mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2006. Disponível em: www.bd.bibl.ita.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=292. Acesso em: 13 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, p. 107. 1997.

_____. **NBR 15521: Ensaios não-destrutivos – Ultra-som – Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas**. Rio de Janeiro, p. 7. 2007.

BARROS, A. R. F. **Compósitos híbridos: desenvolvimento de configuração e efeitos de umidificação**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/15535>. Acesso em: 13 jun. 2020.

BARROS, André Santiago. **Estudo do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de pás eólicas**. 2009. 180 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 2009.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2974/000379925.pdf?sequence=1>. Acesso em: 13 jun. 2020.

BRANCO, J. M.; TEODORESCU, I.; PEREIRA, B. Ligações com cavilhas de madeira: aplicações e quantificação da sua resistência. *In*: CONGRESSO IBERO-LATINO AMERICANO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, 1., 2011, Coimbra. **Anais [...]**. Coimbra: Departamento da Engenharia Civil da FCTUC, 2011.

BRANCO, J.; SANTOS, A.; CRUZ, P.. Asnas tradicionais de madeira: comportamento e reforço com materiais compósitos. **Revista Portuguesa de**

Engenharia de Estruturas, [S. l.], v. 3, n. d, p. 5-18, 2008. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/9210>. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/9210>. Acesso em: 13 jun. 2020.

BRAVO, Cintia Grazielle Alves dos Santos; BRANCO, Luiz Antonio Melgaço Nunes; CHAHUD, Eduardo; AQUINO, Vinicius Borges de Moura; DIAS, Alfredo Manuel Pereira Geraldés; CHRISTOFORO, Andre Luis; LAHR, Francisco Antonio Rocco. Carbon fiber-reinforced polymers as a tensile reinforcement of the Pinus elliotti and Manilkara huberi wood species. **Maderas. Ciencia y tecnología**, [S. l.], v. 22 (1), n. ahead, p. 37–34, 2020. DOI: 10.4067/s0718-221x2020005000104.

BRITO, L. D.; CALIL JÚNIOR, C.; SAAD, N. S. Sistemas estruturais de coberturas de madeira tipo “hauff” consolidadas e existentes em poços de caldas - MG. *In*: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 14., 2014, Natal. **Anais [...]**. João Pessoa: Gráfica e Editora Moura Ramos, 2014.

CALIL JÚNIOR, C.; ROCCO LAHR, F. A.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. São Paulo: Manole, 2003.

_____. *et al.* **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: Suprema, 2006.

CALIL NETO, C. **Ligações com parafusos auto-atarraxantes sem pré-furação para uso em estruturas de madeira**. 2014. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14052014-110108/pt-br.php>. Acesso em: 13 jun. 2020.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISHCH, D. V. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARVALHO, D. F. O. **Asnas tradicionais de cobertura: estudo de ligações com cavilha de aço em madeiras antigas**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.26/18896>. Acesso em: 13 jun. 2020.

CÉSAR, S. F. **Estruturas hauff de madeira do Brasil**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

COSTA, M. L. **Estabelecimento de parâmetros de processamento de compósitos estruturais via análises térmica e viscosimétrica**. 1998. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1998. Disponível em: http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=00039970

7. Acesso em: 13 jun. 2020.

CUSTÓDIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 173–185, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143749608000365>. Acesso em: 13 jun. 2020.

DHANRAJ PAMAR, J. *et al.* Experimental investigation of bi directional carbon fiber composite. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 2, n. 4–5, p. 3008–3016, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785315005301>. Acesso em: 13 jun. 2020.

DIAS, A. **Princípios básicos para projetos de estruturas de madeira massiva**. 2019. (71m) Disponível em: <<https://minicursoem01.club.hotmart.com/lesson/KR4j5m82Oa/parte-unica>>. Acesso em: 13 jun 2019.

DIAS, J. M. S. **Ligações estruturais com barras de aço coladas com epóxi em madeiras de alta densidade**: influência dos defeitos da madeira e dos erros de produção na resistência mecânica. 2015. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. Disponível em: <http://www.ppec.ufba.br/site/publicacoes/ligacoes-estruturais-com-barras-de-aco-coladas-com-epoxi-em-madeiras-de-alta-densidade-i>. Acesso em: 13 jun. 2020.

EUROPEAN Committee for Standardization. **Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. Bélgica, 2004.

GAMA, D. P. N. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. 2017. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <http://www.mec.uff.br/pdftheses/DanielPereiraNunesGama2017.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

GESUALDO, F. A. R. **Ligações de peças estruturais de madeira através de cavilhas partidas de Eucalipto Citriodora**. 1982. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1982ME_FranciscoAntonioRomeroGesualdo.pdf. Acesso em: 13 jun. 2020.

GIOVANELLA, R. Propriedades tecnológicas da madeira relacionadas com a preservação e restauração do patrimônio histórico. **Tuiuti: Ciência e Cultura**, Curitiba, n. 41, p. 97-105, Curitiba, jan./jun. 2009. Disponível em: <https://interrin.utp.br/index.php/h/article/view/1146/979>. Acesso em: 13 jun. 2020.

GOMES, O. F. **Estudo das ligações cavilhadas impregnadas com resinas estirênicas empregadas em estruturas de madeira**. 1997. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-02042018-102638/pt-br.php>. Acesso em: 13 jun. 2020.

HALLER, P. *et al.* Fully fashioned biaxial weft knitted and stitch bonded textile reinforcements for wood connections. **Composites Part B: Engineering**, [S. l.], v. 37, n. 4–5, p. 278–285, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/composites-part-b-engineering/vol/37/issue/4>. Acesso em: 13 jun. 2020.

HILÁRIO, Ricardo. **Dimensionamento de estruturas em madeira: metodologia e disposições regulamentares relativamente a ligações**. 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Técnico de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146006825/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

FERREIRA, R. O. P.; L'HOTELLIER, E. O.; PASSOS, A. C. Análise comparativa entre o método de análise hierárquica e o método todim: um estudo de caso. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 4., 2007, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos** [...]. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2007. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br.spolm/files/097.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

JOHANSEN, K. W. Theory of Timber Connections. **IABSE: International Association of Bridge and Structural Engineering**, [S. l.], v. 9, p. 249–262, 1949. Disponível em: <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=bse-me-001:1949:9::18>. Acesso em: 13 jun. 2020.

JUVANDES, L. Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas. *In*: JORNADAS DE MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO, 1., 2011, Porto. **Anais eletrônicos** [...]. Porto: Universidade do Porto, 2011. Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Luis_Juvandes.pdf. Acesso em: 13 jun. 2020.

MACHADO, A. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Pini, 2002.

MASTBERGEN, D. B. **Simulation and testing of resin infusion manufacturing processes for large composite structures**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Montana, Bozeman, 2004. Disponível em: <https://www.montana.edu/composites/documents/Dan%20Mastbergen%20thesis.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

MENDES, P. M. F. C. **Ligações em estruturas de madeira** : tecnologia e dimensionamento de acordo com o eurocódigo 5. 1994. 165f. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1994. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11777>. Acesso em: 13 jun. 2020.

MILCH, J. *et al.* The numerical assessment of a full-scale historical truss structure reconstructed with use of traditional all-wooden joints. **Journal of Cultural Heritage**, [S. l.], v. 21, p. 759-766, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1296207416300450>. Acesso em: 13 jun. 2020.

MOHAMAD, G.; ACCORDI, J.; ROCA, L. E. Avaliação da associação de compósito de fibra de vidro e carbono no reforço de madeira de *Eucalyptus in natura* e autoclavada. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 621-637, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762011000100009&script=sci_abstract&tlng=es. Acesso em: 13 jun. 2020.

MORAES, P. D.; ESPÍNDOLA, R.; BARICHELO, C. **Sistema Plataforma em madeira: coordenação modular e conectividade**. [Relatório de pesquisa]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

NAPPI, Manuela Marques Lalane. **Corrosão de elementos metálicos embutidos em diferentes espécies de madeira**. 2012. Florianópolis, 2012.

NAPPI, M. M. L. **Corrosão de elementos metálicos embutidos em diferentes espécies de madeira**. 2012. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/99245/304922.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 jun. 2020.

NASCIMENTO, D. C. O. **Análise das propriedades de compósitos de fibras de piaçava e matriz de resina epóxi**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2009. Disponível em: uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-Completa.pdf. Acesso em: 13 jun. 2020.

NASSEH, J. **Técnica e prática de laminação em composites**. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2008. Disponível em: <http://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/Site/wp-content/uploads/2011/12/tplc.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

NOGUEIRA, C. L.; MARLET, J. M. F.; REZENDE, M. C. Processo de obtenção de pré-impregnados poliméricos termoplásticos via moldagem por compressão a quente. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 18-27, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/po/v9n3/6166.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

OLIVEIRA, Marcos Antonio Melo e; DIAS, Antonio Alves. Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 26, p. 33–64, 2005. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee26.pdf. Acesso em: 13 jun. 2020.

ORTIZ, E. C. **Avaliação do comportamento dinâmico-mecânico de compósito carbono/epóxi/termoplástico em espectro amplo de frequências**. 2008. Dissertação (Mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008. Disponível em: bdtd.ibict.br/vufind/Record/ITA_b9162a70947d6d5013addcd184757fa9. Acesso em: 13 jun. 2020.

OWEN, M. J.; MIDDLETON, V.; JONES, I. A. **Integrated design and manufacture using fibre-reinforced polymeric composites**. Amsterdã: Elsevier, 2000.

OXYBLACK. Compósitos - o que são. Oxublack, [S. l.], [S. d.]. Disponível em: <https://www.oxylblack.com/index.php/pt/compositos>. Acesso em: 13 jun. 2020.

PALMA, P. *et al.* Ligações estruturais do tipo madeira-madeira com placas de madeira densificada e cavilhas de FRP. *In: JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS*, 5. 2014, Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: [S.n.], 2014.

PARDINI, L.; PERES, R. Tecnologia de fabricação de pré-impregnados para compósitos estruturais utilizados na indústria aeronáutica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 32-42, 1996. Disponível em: <https://revistapolimeros.org.br/article/5883713d7f8c9d0a0c8b47d2>. Acesso em: 13 jun. 2020.

PEREIRA, M. C. M.; CALIL JÚNIOR, C. Characterization of Cross Laminated Timber (CLT) panel with wood dowels connection. *In: SIMPÓSIO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS*, 18., 2017, São Carlos. **Anais eletrônicos [...]**. São Carlos: EESC/USP, 2017. Disponível em: <http://www.eventos.eesc.usp.br/index.php/SICEM/xviiiisicem/paper/view/879/475>. Acesso em: 13 jun. 2020.

PERELLES, D. H.; MEDEIROS, M. F.; GARCEZ, M. R. Aplicação da análise hierárquica como ferramenta de tomada de decisão para escolha do compósito de reforço com polímeros reforçados com fibras. **Alconpat**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 161-76, maio/ago. 2013. Disponível em: <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/52>. Acesso em: 13 jun. 2020.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**: dimensionamento segundo na Norma Brasileira NBR 7190/97 e critérios das Normas Norte-Americanas NDS e Europeia EUROCODE 5. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PINA, S. R. O. **Obtenção e caracterização de compósitos poliméricos e cerâmicos reforçados com tecido de fibras de carbono**. 2004. 118 f. Tese (Doutorado em Físico-Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/250496/1/Pina_SamantaRafaeladeOmena_D.pdf. Acesso em: 13 jun. 2020.

PRADO, D. M. **Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com laminados de CFRP por meio de análise estática e modal**. 2016. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-17082016-101324/en.php>. Acesso em: 13 jun. 2020.

ROSA, C. R. M.; STEINER, M. T. A.; COLMENERO, J. C. Utilização de processo de análise hierárquica para definição estrutural e operacional de centros de distribuição: Uma aplicação a uma empresa do ramo alimentício. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 22, n. 4, p. 935–950, 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2015000400935. Acesso em: 13 jun. 2020.

SANTOS, C. L. *et al.* A comparison between the en 383 and ASTM D5764 test methods for dowel-bearing strength assessment of wood: Experimental and numerical investigations. **Strain**, [S. l.], v. 46, n. 2, p. 159–174, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1475-1305.2008.00570.x>. Acesso em: 13 jun. 2020.

SANTOS, C. L. **Comportamento mecânico de ligações do tipo cavilha em estruturas de madeira**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Electromecânica) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013. Disponível em: <https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/1889>. Acesso em: 13 jun. 2020.

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to Materials Science for Engineers**. Londres: Pearson, 2009.

SHUPE, T.; LEBOW, S.; RING, D. **Causes and control of wood decay, degradation and stain**. Baton Rouge: Louisiana Cooperative Extension Service/ Louisiana State University, 2008. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/35536>. Acesso em: 13 jun. 2020.

SILVA, L. J. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2011. Disponível em: https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Leandro_da_Silva_1.pdf. Acesso em: 13 jun. 2020.

TEODORESCU, Ioana; BRANCO, Jorge M.; AQUINO, Caroline D. Experimental evaluation of dowel-type timber joints with wooden dowels.

Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, [S. l.], p. 1–12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1680/jstbu.20.00021>.

YANG, J.; SMITH, S. T.; WANG, Z. Seismic behaviour of fibre-reinforced-timber connections. **Advances in Structural Engineering**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 1–17, ago. 2018. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1369433218794001>. Acesso em: 13 jun. 2020.

ZELINKA, S. L.; RAMMER, D. R. **Review of test methods used to determine the corrosion rate of metals in contact with treated wood**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2005.

APÊNDICE

Tabela A17 – Valores do ensaio de resistência a compressão paralela às fibras.


		Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia				
		Laboratório de Madeiras				
		Ensaio: Compressão paralela às fibras				
		Data: 10/04/2019				
		Responsável: Gabriel Alcântara Dourado de O. Silva				
N	Código	U(%)	Carga máxima (kN)	f _{Co} U% (MPa)	f _{Co} 12% (MPa)	Ordenamento f _{Co} 12% (MPa)
1	1	15,5	188,74	75,50	83,38	60,00
2	2	14,2	191,21	76,48	81,63	63,86
3	3	16,0	174,65	69,86	78,30	69,88
4	4	15,7	174,77	69,91	77,58	73,24
5	5	16,1	184,29	73,72	82,87	76,67
6	6	15,5	158,25	63,30	69,88	77,54
7	7	15,8	174,07	69,63	77,54	77,58
8	8	15,0	146,29	58,52	63,86	77,96
9	9	15,9	181,45	72,58	80,98	78,30
10	10	15,1	178,11	71,24	77,96	80,98
11	11	16,3	201,66	80,66	90,96	81,63
12	12	15,9	163,74	65,50	73,24	82,22
13	13	14,9	137,99	55,20	60,00	82,87
14	14	17,1	178,31	71,32	82,22	83,38
15	15	15,8	172,02	68,81	76,67	90,96
Média		15,66			77,14	
Mediana					77,96	
Desvio padrão					7,86	
CV (%)					10,18	
0,7*X_m (70% do valor médio)					54,00	
X₁ (menor valor)					60,00	
X_{wk} (Valor Carac.)					69,10	

Tabela A3 - Valores do ensaio de compressão normal às fibras.


		Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia				
		Laboratório de Madeiras				
		Ensaio: Compressão normal às fibras				
		Data: 10/04/2019				
		Responsável: Gabriel A. D. O. Silva				
N	Código	U(%)	Carga máxima (kN)	fc90 _{U%} (MPa)	fc90 _{12%} (MPa)	Ordenamento fc90 12% (MPa)
1	1	15,5		0,00	0,00	0,00
2	2	14,2	73,71	29,48	31,47	19,87
3	3	16,0	75,85	30,34	34,00	20,18
4	4	15,7	80,19	32,08	35,60	22,07
5	5	16,1	67,35	26,94	30,29	25,13
6	6	15,5	60,45	24,18	26,69	25,56
7	7	15,8	78,74	31,50	35,07	25,88
8	8	15,0	82,40	32,96	35,97	26,69
9	9	15,9	44,52	17,81	19,87	27,70
10	10	15,1	59,12	23,65	25,88	30,29
11	11	16,3	56,68	22,67	25,56	31,47
12	12	15,9	49,33	19,73	22,07	34,00
13	13	14,9	63,71	25,48	27,70	35,07
14	14	17,1	43,76	17,50	20,18	35,60
15	15	15,8	56,39	22,56	25,13	35,97
Média		15,66			28,25	
Mediana					27,20	
Desvio padrão					5,59	
CV (%)					19,80	
0,7*Xm (70% do valor médio)					19,77	
X1 (menor valor)					19,87	
Xwk (Valor Carac.)					21,49	

Tabela A4 - Valores do ensaio de flexão estática


		Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia					
		Laboratório de Madeiras					
		Ensaio: Flexão estática					
		Data: 29/03/2019					
		Responsável: Gabriel Alcântara Dourado de O. Silva					
N	Código	U(%)	Carga (kgf)	Mom. Máx. (N/m)	fM U% (MPa)	σ_{v0} 12% (MPa)	Ordenamento
1	1	15,5			0,00	0,00	
2	2	14,2	7679	2111,62	116,01	123,82	
3	3	16,0	9137	2512,64	138,04	154,71	88,37
4	4	15,7	8454	2324,75	127,72	141,73	94,81
5	5	16,1	9439	2595,65	142,60	160,30	109,01
6	6	15,5	7419	2040,21	112,08	123,73	118,77
7	7	15,8	8786	2416,24	132,74	147,82	123,73
8	8	15,0	6611	1818,11	99,88	109,01	123,82
9	9	15,9	5243	1441,71	79,20	88,37	141,73
10	10	15,1	10192	2802,81	153,98	168,48	147,82
11	11	16,3	9710	2670,13	146,69	165,41	154,71
12	12	15,9	10874	2990,31	164,28	183,71	160,30
13	13	14,9	7232	1988,68	109,25	118,77	165,41
14	14	17,1	5444	1497,11	82,25	94,81	168,48
15	15	15,8			0,00	0,00	183,71
Média		15,66	8170,62	2246,92	123,44	136,97	136,97
Mediana							141,73
Desvio padrão							29,70
CV (%)							21,68
0,7*Xm (70% do valor médio)							95,88
X1 (menor valor)							88,37
Xwk (Valor Carac.)							99,06

Tabela A5 - Valores do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.


		Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia								
		Laboratório de Madeiras								
		Data: 27/03/2019								
		Aluno: Gabriel Alcântara Dourado de Oliveira e Silva								
		Pesquisa: Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras								
N	Código	U(%)	T (°C)	Taxa de carregamento (MPa/min)	Carga (kgf)	f_{v0} (N)	A_v (m ²)	σ_{v0} (MPa)	Ordenamento	
1	1A	15,5	20,0	2,5	4010	39324,67	0,0025	15,73	10,90	
2	2A	14,2	20,0	2,5	3190	31283,21	0,0025	12,51	11,02	
3	3A	16,0	20,0	2,5	3680	36088,47	0,0025	14,44	11,18	
4	4A	15,7	20,0	2,5	4040	39618,87	0,0025	15,85	11,34	
5	5A	16,1	20,0	2,5	3860	37853,67	0,0025	15,14	11,41	
6	6A	15,5	20,0	2,5	3310	32460,01	0,0025	12,98	11,49	
7	7A	15,8	20,0	2,5	2910	28537,35	0,0025	11,41	12,40	
8	8A	15,0	20,0	2,5	3750	36774,94	0,0025	14,71	12,51	
9	9A	15,9	20,0	2,4	3660	35892,34	0,0025	14,36	12,98	
10	10	15,1	20,0	2,5	2780	27262,49	0,0025	10,90	14,36	
11	11A	16,3	20,0	2,5	2930	28733,48	0,0025	11,49	14,44	
12	12A	15,9	20,0	2,5	3160	30989,01	0,0025	12,40	14,71	
13	13A	14,9	20,0	2,5	2890	28341,22	0,0025	11,34	15,14	
14	14A	17,1	20,0	2,5	2850	27948,95	0,0025	11,18	15,73	
15	15A	15,8	20,0	2,5	2810	27556,69	0,0025	11,02	15,85	
Média		15,66							13,03	
Mediana									12,51	
Desvio padrão									1,83	
CV (%)									14,02	
0,7*Xm (70% do valor médio)									9,12	
X1 (menor valor)									14,44	
Xwk (Valor Carac.)									11,06	

Tabela A6 - Valores de flexão em cavilhas


 Laboratório de Madeiras ufba - ep - dce		Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia								
		Laboratório de Madeiras								
		Ensaio: Flexão em cavilhas								
		Data: 10/07/2019								
		Responsável: Gabriel Alcântara Dourado de O. Silva								
Diâmetros		16 mm			18 mm			20 mm		
N	Código	sem reforço - Carga máxima (kN)	1 camada de PRFC - Carga máxima (kN)	2 camadas de PRFC - Carga máxima (kN)	sem reforço - Carga máxima (kN)	1 camada de PRFC - Carga máxima (kN)	2 camadas de PRFC - Carga máxima (kN)	sem reforço - Carga máxima (kN)	1 camada de PRFC - Carga máxima (kN)	2 camadas de PRFC - Carga máxima (kN)
1	1	0,79	1,24	1,84	1,51	2,00	2,33	1,40	2,00	2,65
2	2	0,8	1,25	1,68	1,29	1,87	2,19	1,87	2,10	2,94
3	3	0,86	1,09	1,38	1,27	1,92	2,35	1,95	2,18	3,53
4	4	0,94	1,35	1,80	1,39	1,88	1,96	1,76	2,40	2,54
5	5	0,93	1,37	1,45	1,36	1,99	1,91	2,00	2,36	2,72
6	6	0,85	1,06	1,93	1,39	1,88	2,18	1,57	2,40	3,01
7	7	0,79	1,20	2,11	1,2	1,82	-	1,52	2,22	3,43
8	8	0,9	1,17	-	1,31	2,00	-	1,63	2,30	-
9	9	0,82	1,08	-	1,23	1,91	-	1,80	2,32	-
10	10	1,03	1,22	-	1,27	1,38	-	1,68	2,40	-
11	11	0,89	1,19	-	1,1	1,89	-	1,72	2,40	-
12	12	0,86	1,13	-	1,36	1,77	-	1,66	2,16	-
Média		0,87	1,20	1,74	1,31	1,86	2,15	1,71	2,27	2,97
Mediana		0,86	1,20	1,80	1,30	1,89	2,19	1,70	2,31	2,94
Desvio padrão		0,07	0,10	0,26	0,11	0,17	0,18	0,18	0,14	0,38
CV (%)		8,20	8,27	14,90	8,12	8,94	8,53	10,25	5,99	12,86
X1 (menor valor)		0,79	1,06	1,38	1,10	1,38	1,91	1,40	2,00	2,54
X12 (maior valor)		1,0	1,37	2,11	1,1	1,4	2,4	2,0	2,4	3,5

Tabela A7 - Valores do ensaio de propagação de ondas sonoras para as peças de 180 cm.

Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia																	
Laboratório de Madeiras																	
Data:	29/11/2018																
Responsável:	Gabriel Alcântara Dourado de O. Silva																
Ensaio:	Propagação de ondas sonoras na madeira																
CP	Código	Umidade				Tempo de propagação			Velocidade (V _U) (m/s)			VLL interme	VLL int. x 10%	ρ _{ap} (U%) (kg/m ³)	V _{U,sat}	Comprimento (m)	Classe
		U ₁	U ₂	U ₃	U _{médio}	t ₁	t ₂	t ₃	V _{U,1}	V _{U,2}	V _{U,3}						
1	1A	15,9	21,2	23,7	20,3	369	363	365	4958,7	4958,7	4931,5	4958,7	495,9	1180,8	4718,7	1,80	UD-60
2	2A	12,7	15,9	13,6	14,1	428	443	405	4205,6	4063,2	4444,4	4205,6	420,6	1180,8	3866,5	1,80	UD-30
3	3A	19,2	17,3	15,3	17,3	436	444	427	4117,0	4042,8	4203,7	4117,0	411,7	1180,8	3829,0	1,80	UD-30
4	4A	19,9	22,7	16,2	19,6	352	357	350	5099,4	5028,0	5128,6	5099,4	509,9	1180,8	4848,8	1,80	UD-60
5	5A	16,0	17,8	22,5	18,8	354	347	373	5084,7	5187,3	4825,7	5084,7	508,5	1180,8	4820,8	1,80	UD-60
6	6A	12,7	17,4	17,0	15,7	518	468	457	3474,9	3846,2	3938,7	3846,2	384,6	1180,8	3533,1	1,80	UD-25
7	7A	16,8	19,0	20,7	18,8	471	455	475	3821,7	3956,0	3789,5	3821,7	382,2	1180,8	3558,8	1,80	UD-25
8	8A	14,9	16,7	17,9	16,5	363	380	379	4958,7	4736,8	4749,3	4749,3	474,9	1180,8	4449,1	1,80	UD-50
9	9A	27,4	26,0	27,1	26,8	395	397	367	4557,0	4534,0	4904,6	4557,0	455,7	1180,8	4422,1	1,80	UD-50
10	10A	14,4	14,3	18,0	15,6	358	355	363	5014,0	5056,3	4944,9	5014,0	501,4	1180,8	4698,8	1,80	UD-60
11	11A	14,7	17,9	20,6	17,7	347	357	341	5187,3	5042,0	5278,6	5187,3	518,7	1180,8	4906,8	1,80	UD-60
12	12A	19,5	17,7	16,6	17,9	447	469	502	4026,8	3838,0	3585,7	3838,0	383,8	1180,8	3560,7	1,80	UD-25
13	13A	15,2	16,5	20,0	17,2	361	363	374	4986,1	4958,7	4812,8	4958,7	495,9	1180,8	4670,2	1,80	UD-60
14	14A	17,6	18,5	20,4	18,8	357	365	352	5042,0	4931,5	5113,6	5042,0	504,2	1180,8	4779,1	1,80	UD-60
15	15A	20,5	18,9	18,2	19,2	348	354	361	5172,4	5084,7	4986,1	5084,7	508,5	1180,8	4827,7	1,80	UD-60
Observações	Secção transversal das peças: 14,5 x 5 cm.																

Tabela A8 - Valores do ensaio de propagação de ondas sonoras para as peças de 120 cm.

Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia																	
Laboratório de Madeiras																	
Data:	29/11/2018																
Responsável:	Gabriel Alcântara Dourado de O. Silva																
Ensaio:	Propagação de ondas sonoras na madeira																
CP	Código	Umidade				Tempo de propagação			Velocidade (V _{LL}) (m/s)			VLL interme	VLL int. x 10%	ρ _{ap} (U%) (kg/m ³)	V _{LLsat}	Comprimento (m)	Classe
		U ₁	U ₂	U ₃	U _{médio}	t ₁	t ₂	t ₃	V _{LL,1}	V _{LL,2}	V _{LL,3}						
1	1B	15,9	21,2	23,7	20,3	244	240	245	4877,0	4958,3	4857,1	4877,0	487,7	1180,8	4637,1	1,19	UD-60
2	2B	12,7	15,9	13,6	14,1	269	257	288	4572,5	4786,0	4270,8	4572,5	457,2	1180,8	4233,3	1,23	UD-35
3	3B	19,2	17,3	15,3	17,3	254	250	285	4842,5	4920,0	4315,8	4842,5	484,3	1180,8	4554,6	1,23	UD-55
4	4B	19,9	22,7	16,2	19,6	236	241	234	5042,4	4937,8	5085,5	5042,4	504,2	1180,8	4791,8	1,19	UD-60
5	5B	16,0	17,8	22,5	18,8	237	244	231	5042,2	4897,5	5173,2	5042,2	504,2	1180,8	4778,2	1,20	UD-60
6	6B	12,7	17,4	17,0	15,7	242	243	245	4933,9	4913,6	4873,5	4913,6	491,4	1180,8	4600,6	1,19	UD-60
7	7B	16,8	19,0	20,7	18,8	267	279	282	4513,1	4319,0	4273,0	4319,0	431,9	1180,8	4056,1	1,21	UD-35
8	8B	14,9	16,7	17,9	16,5	232	233	238	5146,6	5124,5	5016,8	5124,5	512,4	1180,8	4824,3	1,19	UD-60
9	9B	27,4	26,0	27,1	26,8	242	233	252	4917,4	5107,3	4722,2	4917,4	491,7	1180,8	4782,5	1,19	UD-60
10	10B	14,4	14,3	18,0	15,6	240	246	252	5000,0	4878,0	4761,9	4878,0	487,8	1180,8	4562,9	1,20	UD-55
11	11B	14,7	17,9	20,6	17,7	235	230	240	5123,4	5234,8	5016,7	5123,4	512,3	1180,8	4842,9	1,20	UD-60
12	12B	19,5	17,7	16,6	17,9	273	281	267	4395,6	4270,5	4494,4	4395,6	439,6	1180,8	4118,3	1,20	UD-35
13	13B	15,2	16,5	20,0	17,2	243	242	255	4938,3	4958,7	4705,9	4938,3	493,8	1180,8	4649,8	1,20	UD-60
14	14B	17,6	18,5	20,4	18,8	249	244	250	5040,2	5143,4	5020,0	5040,2	504,0	1180,8	4777,3	1,26	UD-60
15	15B	20,5	18,9	18,2	19,2	332	337	332	5120,5	5044,5	5120,5	5120,5	512,0	1180,8	4863,5	1,70	UD-60
Observações		Secção transversal das peças: 14,5 x 5 cm.															

Tabela A9 - Valores do ensaio de propagação de ondas sonoras para as peças de 15 cm.

Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia Laboratório de Madeiras																	
Data:	29/11/2018																
Responsável:	Gabriel Alcântara Dourado de O. Silva																
Pesquisa:	Propagação de ondas sonoras na madeira																
CP	Código	Umidade				Tempo de propagação			Velocidade (V _u) (m/s)			VLL intermediário	VLL int. x 10%	ρ _{ap} (U%) (kg/m ³)	V _{LLsat}	Comprimento (m)	Classe
		U ₁	U ₂	U ₃	U _{médio}	t ₁	t ₂	t ₃	V _{u,1}	V _{u,2}	V _{u,3}						
1	1A	15,9	21,2	23,7	20,3	29,9	29,9	29,9	5016,7	5016,7	5016,7	5016,7	501,7	1180,8	4776,8	0,15	UD-60
2	2A	12,7	15,9	13,6	14,1	30,9	30,9	30,9	4854,4	4854,4	4854,4	4854,4	485,4	1180,8	4515,2	0,15	UD-55
3	3A	19,2	17,3	15,3	17,3	31,4	31,4	31,4	4777,1	4777,1	4777,1	4777,1	477,7	1180,8	4489,1	0,15	UD-50
4	4A	19,9	22,7	16,2	19,6	26,9	26,9	26,9	5576,2	5576,2	5576,2	5576,2	557,6	1180,8	5325,6	0,15	UD-60
5	5A	16,0	17,8	22,5	18,8	29,4	29,4	29,4	5102,0	5102,0	5102,0	5102,0	510,2	1180,8	4838,1	0,15	UD-60
6	6A	12,7	17,4	17,0	15,7	30,9	30,9	30,9	4854,4	4854,4	4854,4	4854,4	485,4	1180,8	4541,4	0,15	UD-55
7	7A	16,8	19,0	20,7	18,8	28,4	28,4	28,4	5281,7	5281,7	5281,7	5281,7	528,2	1180,8	5018,8	0,15	UD-60
8	8A	14,9	16,7	17,9	16,5	31,4	31,4	31,4	4777,1	4777,1	4777,1	4777,1	477,7	1180,8	4476,9	0,15	UD-50
9	9A	27,4	26,0	27,1	26,8	28,9	28,9	28,9	5190,3	5190,3	5190,3	5190,3	519,0	1180,8	5055,4	0,15	UD-60
10	10A	14,4	14,3	18,0	15,6	28,9	28,9	28,9	5190,3	5190,3	5190,3	5190,3	519,0	1180,8	4875,2	0,15	UD-60
11	11A	14,7	17,9	20,6	17,7	28,9	28,9	28,9	5190,3	5190,3	5190,3	5190,3	519,0	1180,8	4909,8	0,15	UD-60
12	12A	19,5	17,7	16,6	17,9	31,4	31,4	31,4	4777,1	4777,1	4777,1	4777,1	477,7	1180,8	4499,8	0,15	UD-55
13	13A	15,2	16,5	20,0	17,2	28,9	28,9	28,9	5190,3	5190,3	5190,3	5190,3	519,0	1180,8	4901,8	0,15	UD-60
14	14A	17,6	18,5	20,4	18,8	29,9	29,9	29,9	5016,7	5016,7	5016,7	5016,7	501,7	1180,8	4753,8	0,15	UD-60
15	15A	20,5	18,9	18,2	19,2	28,4	28,4	28,4	5281,7	5281,7	5281,7	5281,7	528,2	1180,8	5024,7	0,15	UD-60
Observações	Seção transversal dos corpos de prova: 5x5 cm																

Tabela A10 - Valores do ensaio ligações para as condições de compressão paralela às fibras.

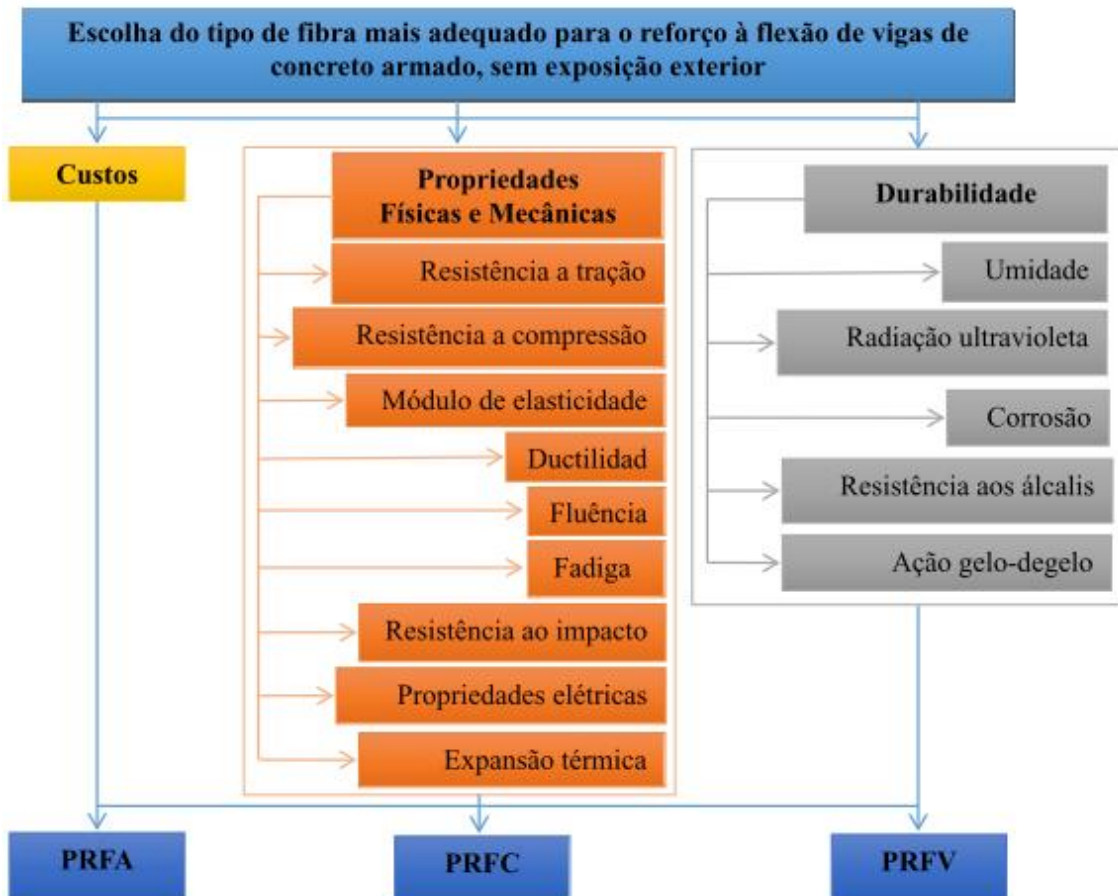
SÉRIE	CP1	CP2	CP3	MÉDIA (kN)	MÉDIA (N)	*dividir por número de pinos e número de planos de corte - dividir por 4	Diametro (mm)	Resistência ao Embutimento	My,k (N.mm) - SOLVER	Carga Resist. (N)	My - Método Fukuyama (N.mm)	Fukuyama/ My
LCP SR16	53,9	36,39	53,19	47,83	47827	11957	16	81,28	41565	11957	2490	5,99%
LCP 1C16	49,28	57,28	57,87	54,81	54810	13703	16,8	80,50	52490	13703	2745	5,23%
LCP 2C16	62,39	60,74	61,58	61,57	61570	15393	17,6	79,73	63822	15391	3012	4,72%
LCP SR18	69,93	69,84	69,99	69,92	69920	17480	18	79,34	80914	17483	3151	3,89%
LCP 1C18	67,91	67,2	67,56	67,56	67557	16889	18,8	78,57	73008	16889	3437	4,71%
LCP 2C18	76,2	89,97	83,10	83,09	83090	20773	19,6	77,80	106975	20771	3736	3,49%
LCP SR20	75,67	78,25	80,31	78,08	78077	19519	20	77,41	93041	19519	3890	4,18%
LCP 1C20	79,04	82,81	80,90	80,92	80917	20229	20,8	76,63	97079	20231	4208	4,33%
LCP 2C20	78,35	80,59	85,85	81,60	81597	20399	21,6	75,86	96012	20399	4537	4,73%

Tabela A11 - Valores do ensaio ligações para as condições de compressão normal às fibras.

SÉRIE	CP1	CP2	CP3	MÉDIA (kN)	MÉDIA (N)	*dividir por número de pinos e número de planos de corte - dividir por 4	Diametro (mm)	Resistência ao Embutimento	My,k (N.mm) - SOLVER	Carga Resist. (N)	My - Método Fukuyama	Fukuyama /My
LCN SR16	47,78	44,55	42,81	45,05	45047	11262	16	81,28	36873	11262	2490	6,75%
LCN 1C16	46,84	54,08	54,95	51,96	51957	12989	16,8	80,50	47163	12989	2745	5,82%
LCN 2C16	51,63	55,01	53,33	53,32	53323	13331	17,6	79,73	47874	13330	3012	6,29%
LCN SR18	46,41	43,77	43,01	44,40	44397	11099	18	79,34	32605	11098	3151	9,66%
LCN 1C18	57,59	55,34	55,48	56,14	56137	14034	18,8	78,57	50411	14034	3437	6,82%
LCN 2C18	53,28	61,09	57,20	57,19	57190	14298	19,6	77,80	50675	14296	3736	7,37%
LCN SR20	40,15	54,01	52,89	49,02	49017	12254	20	77,41	36670	12254	3890	10,61%
LCN 1C20	64,95	60,73	64,06	63,25	63247	15812	20,8	76,63	59301	15812	4208	7,10%
LCN 2C20	57,05	61,87	59,45	59,46	59456	14864	21,6	75,86	50985	14865	4537	8,90%

ANEXOS

Figura B1 – Configuração do processo da análise hierárquica.



Fonte: Perelles, Medeiros e Garcez (2013).

Tabela B1 – Matriz de decisão e importância de cada critério.

Escala de importância		Custos	Propriedades Físicas e Mecânicas	Durabilidade	Total Parcial	Importância Relativa
Menos importante	1/2					
Igual importância	1					
Mais importante	2					
Custos		1	1/2	1/2	2	0,20
Propriedades Físicas e Mecânicas		2	1	1	4	0,40
Durabilidade		2	1	1	4	0,40
Total Geral (TG)					10	1,00

Fonte: Perelles, Medeiros e Garcez (2013).

Tabela B2 – Escalas de importância para variáveis relacionadas às propriedades físicas e mecânicas.

Escala de importância		Resistência à tração	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade	Ductilidade	Fluência	Fadiga	Resistência ao impacto	Propriedades elétricas	Expansão térmica	Total da linha (TL)	Total da variável (TV)
Menos importante	1/2											
Mesma importância	1											
Mais importante	2											
Resistência à tração		1	2	1	1	1	2	2	2	2	14	0,15
Resistência à compressão		1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1/2	6	0,06
Módulo de elasticidade		1	2	1	1	1	2	2	2	2	14	0,15
Ductilidade		1	2	1	1	1	2	2	2	2	14	0,15
Fluência		1	2	1	1	1	2	2	2	2	14	0,15
Fadiga		1/2	2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	1	10	0,11
Resistência ao impacto		1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1/2	6	0,06
Propriedades elétricas		1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1/2	6	0,06
Expansão térmica		1/2	2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	1	10	0,11
Total Geral (TG)											94	1,00

Fonte: Perelles, Medeiros e Garcez (2013).

Tabela B3 – Escalas de importância para variáveis relacionadas à durabilidade.

Escala de importância		Umidade	Radiação ultravioleta	Corrosão	Resistência aos álcalis	Ação gelo-degelo	Total da linha (TL)	Total da variável (TV)
Menos importante	1/2							
Mesma importância	1							
Mais importante	2							
Umidade		1	2	1	2	2	8	0,28
Radiação ultravioleta		1/2	1	1/2	1/2	1	3,5	0,12
Corrosão		1	2	1	1/2	2	6,5	0,22
Resistência aos álcalis		1/2	2	2	1	2	7,5	0,26
Ação gelo-degelo		1/2	1	1/2	1/2	1	3,5	0,12
Total Geral (TG)							29	1,00

Fonte: Perelles, Medeiros e Garcez (2013).

Tabela B4 – Desempenho das alternativas em relação às propriedades físicas e mecânicas.

Escala de importância	Atribuição de valores			Homogeneização dos dados			Peso da variável	Desempenho de cada alternativa		
	PRFC	PRFA	PRFV	PRFC	PRFA	PRFV		PRFC	PRFA	PRFV
Inadequado 1										
Suficiente 2										
Bom 3										
Muito Bom 4										
Resistência à tração (MPa)	3.400	2.800	1.517	1,00	0,82	0,45	0,15	14,89	12,27	6,65
Resistência à compressão (MPa)	2.652	560	834	1,00	0,21	0,31	0,06	6,38	1,35	2,01
Módulo de elasticidade (GPa)	227	124	72,4	1,00	0,55	0,32	0,15	14,89	8,14	4,75
Ductilidade	2	3	2	0,67	1,00	0,67	0,15	9,93	14,89	9,93
Fluência	4	2	1	1,00	0,50	0,25	0,15	14,89	7,45	3,72
Fadiga	4	2	1	1,00	0,50	0,25	0,11	10,64	5,32	2,66
Resistência ao impacto	3	4	3	0,75	1,00	0,75	0,06	4,79	6,38	4,79
Propriedades elétricas	2	4	4	0,50	1,00	1,00	0,06	3,00	6,00	6,00
Expansão térmica	3	3	4	0,75	0,75	1,00	0,11	8,25	8,25	11,00
Índice de desempenho							1,00	87,66	70,05	51,51

Fonte: Perelles, Medeiros e Garcez (2013).

Tabela B5 – Desempenho das alternativas em relação ao critério de durabilidade.

Escala de importância	Atribuição de valores			Homogeneização dos dados			Peso da variável	Desempenho de cada alternativa		
	PRFC	PRFA	PRFV	PRFC	PRFA	PRFV		PRFC	PRFA	PRFV
Inadequado 1										
Suficiente 2										
Bom 3										
Muito Bom 4										
Umidade	4	2	1	1,00	0,50	0,25	0,28	27,59	13,79	6,90
Radiação ultravioleta	4	2	4	1,00	0,50	1,00	0,12	12,07	6,03	12,07
Corrosão	2	4	4	0,50	1,00	1,00	0,22	11,21	22,41	22,41
Resistência aos álcalis	4	3	1	1,00	0,75	0,25	0,26	25,86	19,40	6,47
Ação gelo-degelo	4	4	4	1,00	1,00	1,00	0,12	12,07	12,07	12,07
Índice de desempenho							1,00	88,79	73,71	59,91

Fonte: Perelles, Medeiros e Garcez (2013).

Tabela A6 – Avaliação final das alternativas.

Alternativa	Custo	Propriedades Físicas e Mecânicas	Durabilidade	Avaliação Final
Importância Relativa	0,20	0,40	0,40	
PRFC	20,00	87,66	88,79	74,58
PRFA	41,67	70,05	73,71	65,84
PRFV	100,00	51,51	59,91	64,57

Fonte: Perelles, Medeiros e Garcez (2013).