



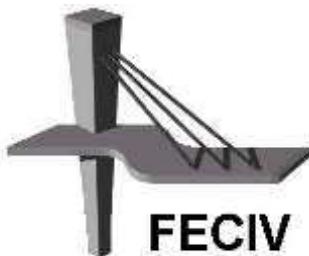
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Dissertação DE MESTRADO

PRODUÇÃO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS EPÓXI E FIBRAS VEGETAIS PARA REFORÇO À FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

HENRIQUE MACHADO FRANCKLIN

UBERLÂNDIA, 24 DE FEVEREIRO DE 2017.



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



HENRIQUE MACHADO FRANCKLIN

**PRODUÇÃO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS EPÓXI E
FIBRAS VEGETAIS PARA REFORÇO À FLEXÃO EM
VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Leila Aparecida de Castro Motta

Co-Orientador: Prof. Dr. Jesiel Cunha

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F824p Francklin, Henrique Machado, 1991-
2017 Produção e análise de compósitos epóxi e fibras vegetais para
reforço à flexão de vigas de concreto armado / Henrique Machado
Francklin. - 2017.
176 f. : il.

Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta.
Coorientador: Jesiel Cunha.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Concreto armado - Estrutura - Teses.
3. Compósitos poliméricos - Teses. 4. Fibras de celulose - Teses. I.
Motta, Leila Aparecida de Castro. II. Cunha, Jesiel. III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. IV. Título.



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 177/2017

CANDIDATO: Henrique Machado Fracklin

Nº. Matrícula: 11422ECV005

ORIENTADOR: Prof.º Dr.º Leila Aparecida de Castro Motta

TÍTULO: "Produção e análise de compósitos epóxi e fibras vegetais para reforço à flexão de vigas de concreto armado".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

PROJETO DE PESQUISA: Inovação em Materiais de Construção Civil

DATA DA DEFESA: 24 de fevereiro de 2017

LOCAL: Sala de Projeções, bloco 1Y. HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 14h / 16h45min

Reuniu-se na Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Antonio Carlos dos Santos** – FECIV/UFU; **Túlio Nogueira Bittencourt** – Poli/USP e **Leila Aparecida de Castro Motta** orientadora do candidato. Ressalta-se que o Prof. Dr. **Túlio Nogueira Bittencourt** participou da defesa por meio de video conferência desde a cidade de São Paulo/SP e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa Prof.º Dr.º Leila Aparecida de Castro Motta apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, a senhora presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato APROVADO. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: Prof.º Dr.º Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU

Membro externo: Prof. Dr. Túlio Nogueira Bittencourt – Poli/USP

Membro interno: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos – FECIV/UFU

*“Bendito o varão que confia no Senhor e
cuja a esperança é o senhor.”*

Jeremias 17:7

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a DEUS, pela oportunidade de estar finalizando mais uma etapa em minha vida.

Aos meus pais, pelo incentivo e força durante toda a minha vida, mesmo passando por todas as adversidades, nunca mediram esforços para me ajudar. Se cheguei até aqui, foi em grande parte por todo apoio, incentivo e orações colocadas em minha intenção.

À minha querida orientadora, Professora Dra. Leila Aparecida de Castro Motta, pela paciência, ajuda, companheirismo, pelo fornecimento de material usado nesta pesquisa e pelas suas valiosas orientações durante este trabalho. Me motivou muito e fez com que me apaixonasse por esta pesquisa.

Ao co-orientador, Professor Dr. Jesiel Cunha, pelas contribuições na realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Antônio Carlos dos Santos e Dr. Túlio Nogueira Bittencourt, pelas valiosas contribuições ao trabalho e participação na banca de defesa.

Ao professor Dr. Turíbio José da Silva, pelas valiosas contribuições oferecidas na banca de qualificação e motivação durante o curso.

Ao Centro de Fiação e Tecelagem de Uberlândia, pela produção dos tecidos com os fios de rami e sisal.

À EMMIG Estruturas Metálicas, pelo fornecimento das chapas metálicas para a produção das fôrmas do reforço.

Aos professores da Universidade Federal de Uberlândia, pelo conhecimento passado durante este programa de pós-graduação.

À CAPES, pela bolsa concedida para realização desta pesquisa.

FRANCKLIN, Henrique Machado. **Produção e análise de compósitos epóxi e fibras vegetais para reforço à flexão em vigas de concreto armado.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017. 176 p.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade técnica da produção e aplicação de polímeros reforçados com fibras vegetais (PRFVeg) como reforço de estruturas em concreto armado. Para tanto, desenvolveu-se um programa experimental, onde compósitos com teores de aproximadamente 50%, 60% e 70% em volume de fibras foram produzidos, e suas propriedades mecânicas à tração foram determinadas para avaliar o teor de fibras e tipo de reforço com melhor desempenho mecânico. Foram adotadas na produção dos PRFVeg, matriz epóxi e fibras vegetais de rami e sisal e seu desempenho foi comparado com compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de carbono (PRFC). O programa experimental foi constituído por duas fases, uma primeira onde foram produzidos e caracterizados os PRFVeg. Na segunda fase, com o objetivo de comparação de desempenho estrutural, foram produzidos os reforços vegetais e aplicados em vigas de concreto armado com diversos tipos de PRF (carbono, rami e sisal), que foram submetidas ao ensaio de flexão, em três pontos, até a ruptura. Os reforços foram ancorados nas vigas de duas formas, pela colagem do reforço na superfície do concreto (CSCC) e em entalhes na camada de cobrimento (CEC), avaliando a melhor condição de reforço e método de ancoragem. Paralelamente ao programa experimental, foram realizadas simulações numéricas, utilizando o método dos elementos finitos, para dimensionar os reforços nas vigas e simular aplicações diferentes das experimentais, estendendo o estudo da aplicação dos compósitos propostos como reforço em estruturas de concreto armado. Os resultados obtidos mostraram que os PRFVeg apresentaram desempenho similar aos já consagrados compósitos com fibras de carbono, aplicados como reforço à flexão de vigas de concreto armado, obtendo incremento de carga de até 76% para os reforços de rami ancorados pela técnica CSCC.

Palavras-chave: reforço estrutural; estruturas de concreto armado; compósitos com fibras de carbono; compósitos com fibras vegetais.

FRANCKLIN, Henrique Machado. **Production and analysis of epoxy composites and vegetable fibers for flexural reinforcement in reinforced concrete beams.** Master's Dissertation, Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2017. 176 p.

ABSTRACT

The present study aims to analyze the production and application of vegetable fibers reinforced polymers (VegFRP) to the reinforcement of reinforced concrete structures. It has been produced composites with contents of about 50% 60% and 70% in fiber volumes. The composites tensile mechanical properties have been determined to evaluate the fiber content and arrangement with the best mechanical performance. Epoxy matrix and ramie and sisal vegetable fibers have been adopted in the production of VegFRP and their performance has been compared to epoxy matrix composites reinforced with carbon fibers (CFRP). The experimental program had been constituted by two phases, the first one in which VegFRP have been produced and characterized. In the second phase, vegetable reinforcements have been produced and applied in reinforced concrete beams, which have been subjected to three-point flex testing. The reinforcements have been anchored to the beams in two forms, glued to the concrete surface and in notches on the covering layer. In parallel to the experimental program it has been performed numerical simulations using the finite elements method to dimension the reinforcements in the beams and simulate applications different from the experimental ones. The obtained results have showed that VegFRP have presented similar performance to the composites with carbon fiber applied as bending reinforcement of reinforced concrete beams. The load increase up to 76% to the ramie VegFRP anchored by the bonding technique of reinforcement on the concrete surface.

Keywords: structural reinforcement; reinforced concrete structures; carbon fibers composites; vegetable fibers composites.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

LETRAS ROMANAS

As	- Área da seção transversal da armadura longitudinal
a_{sw}	- Área da seção transversal da armadura transversal
$a_{sw} \ min$	- Área mínima da armadura transversal.
bw	- Base da viga
cm	- Centímetro
cm^2	- Centímetro quadrado
e	- Espessura do reforço
d	- Altura útil da viga
E_c	- Módulo de elasticidade do compósito
E_{con}	- Módulo de elasticidade do concreto
E_f	- Módulo de elasticidade do reforço
E_m	- Módulo de elasticidade da matriz
E_s	- Módulo de elasticidade do aço
f_{cc}	- Resistência à compressão média do concreto
f_{cd}	- Resistência de cálculo do concreto
f_y	- Resistência ao escoamento da armadura
f_{yd}	- Resistência de cálculo da armadura
f_{yk}	- Resistência característica da armadura
f_{ck}	- Resistência característica do concreto à compressão
f_{ctm}	- Resistência à tração direta do concreto
f_{ywd}	- Resistência ao escoamento de cálculo da armadura
h	- Altura da seção da viga
kg	- Quilograma

kN	- QuiloNewton
kN/cm^2	- QuiloNewton por centímetro quadrado
$\text{kN} \times \text{cm}$	- QuiloNewton centímetro
$\text{kN} \times \text{m}$	- QuiloNewton metro
m	- Metro
m^2	- Metro quadrado
m^3	- Metro cúbico
M_d	- Momento fletor de cálculo
mm	- Milímetro
R_{ix}	- Rígidez da viga com reforço de espessura x (%)
R_{ex}	- Resistência da viga com reforço de espessura x (%)
V_c	- Força cortante resistente pelo concreto
V_{sd}	- Força cortante de cálculo
V_{sw}	- Parcela da força cortante resistida pela armadura transversal
w	- Largura do reforço
x	- Posição da linha neutra

LETRAS GREGAS

ε_c	- Deformação máxima no concreto
ε_s	- Deformação máxima na armadura
η_1	- Coeficiente que depende da orientação das fibras
η_2	- Coeficiente que depende do comprimento das fibras e do comprimento crítico
ν_c	- Coeficiente de Poisson do concreto
ν_s	- Coeficiente de Poisson do aço
ν_f	- Coeficiente de Poisson da fibra
ρ	- Taxa geométrica da armadura
σ_s	- Tensão na armadura
σ_0	- Tensão normal na região central inferior ou superior da viga sem reforço
σ_x	- Tensão normal na região central inferior ou superior da viga com reforço de espessura x
σ_{sd}	- Tensão de escoamento do aço

\varnothing	- Diâmetro
φf	- Fração volumétrica de fibras

ABREVEATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	- American Concrete Institute
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CEB	- Comité Euro-Internacional du Béton
CEC	- Técnica de colagem do reforço na viga em entalhes na camada de cobrimento do concreto
CSCC	- Técnica de colagem do reforço na viga sobre a superfície tracionada do concreto com acabamento chanfrado nas laterais
EN	- European Committee for Standardization
GPa	- Giga Pascal
MPa	- Mega Pascal
NBR	- Norma Brasileira de Regulamentação
PRF	- Polímeros reforçados com fibras
PRFA	- Polímeros reforçados com fibras de aramida
PRFC	- Polímeros reforçados com fibras de carbono
PRFR	- Polímeros reforçados com fibras de rami
PRFS	- Polímeros reforçados com fibras de sisal
PRFV	- Polímeros reforçados com fibras de vidro
PRFVeg	- Polímeros reforçados com fibras Vegetais
RC	- Vigas reforçadas com os compósitos de carbono colados pela técnica CSCC
RR	- Vigas reforçadas com os compósitos de rami colados pela técnica CSCC
RS	- Vigas reforçadas com os compósitos de sisal colados pela técnica CSCC
RCE	- Vigas reforçadas com os compósitos de carbono colados pela técnica CEC
RRE	- Vigas reforçadas com os compósitos de rami colados pela técnica CEC
RSE	- Vigas reforçadas com os compósitos de sisal colados pela técnica CEC
VRef	- Vigas de referência

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Origem das patologias nas estruturas de concreto no Brasil.....	29
Figura 2 – Configurações de reforço com adição de armadura e concreto em pilares, onde (A) reforço em uma face, (B) reforço em 2 faces, (C) reforço em 3 faces, (D) reforço em 4 faces.....	33
Figura 3 – Reforço de pilares em 4 faces, por aumento da seção transversal.	33
Figura 4 – Vigas reforçadas à flexão por aumento da seção transversal.	34
Figura 5 – Esquema de protensão externa da viga.	35
Figura 6 – Desviador e conector usados em reforço de protensão externa.	36
Figura 7 – Esquema de geometria e traçados dos cabos de protensão.	37
Figura 8 – Reforço por protensão externa.....	37
Figura 9 – Métodos de ancoragem utilizados para reforços com chapas metálicas.	39
Figura 10 – Reforço à flexão com chapas de aço ou perfis metálicos.	40
Figura 11 – Reforço ao esforço cortante com chapas de aço ou perfis metálicos.	40
Figura 12 – Sistema de aplicação do tecido PRFC, com as camadas de saturação de resina.	42
Figura 13 – Reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento.	43
Figura 14 – Lajes de concreto armado reforçadas com sistema de fibras de carbono: (a) vista frontal, (b) vista em corte.....	44
Figura 15 – Reforço de pilares à flexão e confinamento.	44
Figura 16 – Reforço de vigas, lajes e transversinas do viaduto de Santa Teresa, em Belo Horizonte – MG.	45
Figura 17 – Reforço ao cisalhamento e flexão de muros, vigas-paredes e alvenarias.	46
Figura 18 – Transferência de esforços entre concreto e reforço.	46
Figura 19 – Modos de ruina em vigas reforçadas à flexão por PRF.	47
Figura 20 – Componentes de um material compósito fibroso.....	51
Figura 21 – Classificação de materiais compósitos relacionado ao tipo de reforço.....	53
Figura 22 – Variação do módulo de elasticidade em função de diferentes teores de fibras.....	54
Figura 23 – Laminados unidirecionais e multidirecionais.	55
Figura 24 – Diagrama tensão x deformação de compósitos reforçados com fibras alinhadas.	57

Figura 25 – Propriedades mecânicas das resinas termoplásticas e termofixas: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração.....	60
Figura 26 – Esquema de tecido plano.....	61
Figura 27 – Classificação das fibras.....	62
Figura 28 – Gráfico de tensão x deformação de materiais fibrosos e aço.....	63
Figura 29 – Ampliação eletrônica de um composto estruturado com fibras de carbono.....	67
Figura 30 – Estrutura de uma fibra vegetal, a imagem em MEV se refere a uma fibra de eucalipto.....	69
Figura 31 – Estrutura das microfibrilas, contendo micelas e moléculas de celulose ordenadas.....	70
Figura 32 – Diagrama tensão deformação das fibras de estudo.....	72
Figura 33 – Plantação de fibras de sisal.....	74
Figura 34 – Micrografias de uma fibra de sisal obtidas por microscopia eletrônica de varredura. a) vista longitudinal, b), c) e d) seção transversal.....	74
Figura 35 – Aspectos das folhas, caule e flores do rami.....	75
Figura 36 – a) vista longitudinal e b) seção transversal de fibras de rami obtidos por microscopia eletrônica de varredura.....	76
Figura 37 – Esquema de processamento de tecidos e resinas para obtenção de compósitos.....	77
Figura 38 – Número de publicações relacionados a compósitos termoplásticos e termofixos reforçados com fibras naturais nos últimos anos.....	78
Figura 39 – Resultados obtidos (Carga x Flecha) em vigas de concreto armado não reforçadas e reforçadas com compósitos de epóxi/fibras de carbono e epóxi/fibras de rami.....	81
Figura 40 – Fibras e fios.....	83
Figura 41 – a) tecido de rami e b) tecido de sisal.....	84
Figura 42 – Produtos para composição da resina epóxi utilizada.....	84
Figura 43 – Corte e alinhamento das fibras de sisal.....	87
Figura 44 – Laminados de fibras de sisal após secagem.....	87
Figura 45 – Preparação dos tecidos de rami e sisal.....	88
Figura 46 – Preparação para a moldagem dos compósitos.....	88
Figura 47 – Etapas da preparação dos compósitos vegetais para testes de tração.....	90
Figura 48 – Corte dos corpos de prova dos compósitos a laser.....	91
Figura 49 – Compósito de resina epóxi reforçado com fibras de sisal para testes de tração.....	91
Figura 50 – Compósito de resina epóxi reforçado com tecidos de sisal para testes de tração.....	91
Figura 51 – Compósito de resina epóxi reforçado com tecidos de rami para testes de tração.....	92
Figura 52 – Dimensões dos corpos de prova dos compósitos.....	92
Figura 53 – Ensaio de tração dos compósitos com fibras vegetais.....	93
Figura 54 – Geometria de ensaio proposto pela norma ASTM D3039:2014.....	94

Figura 55 – Corpos de prova para ensaio à tração dos laminados de carbono.....	94
Figura 56 – Detalhes de ensaio à tração dos laminados de carbono.....	95
Figura 57 – Representação da malha de elementos finitos.....	96
Figura 58 – Modelagem de viga bi-apoiada reforçada com PRFC. (a) Condições de contorno e de carregamento; (b) Detalhes da armadura e da posição do reforço.....	97
Figura 59 – Elemento BEAM188.....	98
Figura 60 – Elemento SOLID185.....	99
Figura 61 – Tensões normais antes (a) e após (b) a colagem do reforço (kN/cm ²).....	99
Figura 62 – Detalhamento da armadura (a) e locação em fôrma (b).....	102
Figura 63 – Lixamento das armaduras longitudinais de tração.....	103
Figura 64 – Fôrmas utilizadas para confecção das vigas.....	103
Figura 65 – Produção dos entalhes no cobrimento do concreto.....	104
Figura 66 – Curva granulométrica da areia fina.....	105
Figura 67 – Curva granulométrica da areia média.....	105
Figura 68 – Curva granulométrica da brita basáltica, graduação 9,5/25.....	106
Figura 69 – Método de moldagem dos corpos de prova prismáticos.....	107
Figura 70 – Moldagem das vigas prismáticas.....	108
Figura 71 – Corpos de prova de concreto imersos em tanques com água.....	108
Figura 72 – Fôrma metálica para produção dos PRFVeg com comprimento de 40,5 cm.....	109
Figura 73 – Etapas da preparação dos compósitos reforçados com tecidos de rami para reforço.....	109
Figura 74 – Etapas da preparação dos compósitos reforçados com fibras de sisal para reforço.....	110
Figura 75 – Corte dos PRFVeg para reforço.....	111
Figura 76 – Polímero reforçado com fios de rami (PRFR) para reforço.....	111
Figura 77 – Polímero reforçado com fibras de sisal (PRFS) para reforço.....	111
Figura 78 – PRFR pronto para colagem nas vigas.....	113
Figura 79 – PRFS pronto para colagem nas vigas.....	113
Figura 80 – Laminados de fibras de carbono.....	113
Figura 81 – Recipiente do adesivo epóxi e catalizador.....	114
Figura 82 – Preparação da superfície da viga, com rebolo para desbaste de concreto, acoplado a uma esmerilhadeira.....	115
Figura 83 – Demarcação da área para reforço.....	115
Figura 84 – Preparação da resina epóxi.....	116
Figura 85 – Aplicação do reforço à viga.....	116
Figura 86 – Reforços colados nas vigas pelo método CSCC.....	117
Figura 87 – Reforços colados nas vigas pelo método CEC.....	117
Figura 88 – Extensômetros soldados na armadura.....	118

Figura 89 – Representação esquemática do dispositivo “YOKE”	119
Figura 90 – Sistema para aquisição de dados.....	119
Figura 91 – Esquema de ensaio à flexão das vigas: a) detalhamento do posicionamento da viga no dispositivo, b) perspectiva do ensaio.....	120
Figura 92 – Diagrama tensão x deformação obtido no ensaio à tração dos laminados de carbono.	122
Figura 93 – Propriedades mecânicas dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal alinhadas unidirecionalmente: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação.	125
Figura 94 – Propriedades mecânicas dos compósitos de resina epóxi reforçados com tecidos de sisal: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação	127
Figura 95 – Propriedades mecânicas dos compósitos de resina epóxi reforçados com tecidos de rami: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação	129
Figura 96 – Módulo de elasticidade dos compósitos em estudo.	131
Figura 97 – Resistência à tração dos compósitos em estudo.....	132
Figura 98 – Deformação máxima na ruptura dos compósitos em estudo.....	132
Figura 99 – Diagrama tensão x deformação obtido para a matriz e diferentes compósitos.	133
Figura 100 – Corpos de prova ensaiados.	134
Figura 101 – Ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.....	135
Figura 102 – Ensaio à tração da barra de aço.....	137
Figura 103 – Ensaio de resistência à compressão do adesivo epóxi.	137
Figura 104 – Modos de ruptura das vigas de referência.....	138
Figura 105 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFC-CSCC.....	139
Figura 106 – Ruptura do concreto no bordo comprimido das vigas RC-3 e RC-5.	140
Figura 107 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFR-CSCC.....	141
Figura 108 – Ilustração dos modos de ruptura das vigas RR-2 e RR-5.	142
Figura 109 – Ruptura do concreto no bordo comprimido das vigas RR-1 e RR-5.	142
Figura 110 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFS-CSCC.	143
Figura 111 – Ruptura do concreto no bordo comprimido das vigas RS-2, RS-3, RS-4 e RS-5....	144
Figura 112 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFC-CEC.	144
Figura 113 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFR-CEC.	145
Figura 114 – Ruptura do concreto no bordo comprimido das vigas RRE-1 e RRE-2.	145
Figura 115 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFS-CEC.	146
Figura 116 – Ruptura do concreto no bordo comprimido da viga RSE-1.....	146
Figura 117 – Comparação entre forças de ruptura e fissuração das vigas ensaiadas.	147

Figura 118 – Diagrama força x deslocamento médio, obtidos para as vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC e PRFVeg, ancoradas pelo método: a) CSCC, b) CEC.....	149
Figura 119 – Diagramas força x deformação da armadura, obtidos para as vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC e PRFVeg, ancorados pelo método: a) CSCC, b) CEC.....	151
Figura 120 – Detalhamento de ensaio de uma viga em situação real de serviço.....	153
Figura 121 – Detalhamento da armadura de uma viga em situação real de serviço.....	155
Figura 122 – Modelo de elementos das vigas reforçadas.....	156
Figura 123 – Distribuição das tensões σ_x na viga reforçada com PRFC e PRFVeg.	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo de materiais para reforço de estruturas no setor da construção civil.....	32
Tabela 2 – Principais características dos PRF.....	41
Tabela 3 – Tipo de reforço e os respectivos tipos de PRF usados.	43
Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas de resinas termofixas.....	58
Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas de resinas termoplásticas.....	59
Tabela 6 – Propriedades físicas e mecânicas dos principais tipos de fibras sintéticas.....	66
Tabela 7 – Composição química das fibras naturais.	71
Tabela 8 – Propriedades mecânicas das fibras naturais.	71
Tabela 9 – Compósitos termofixos e termoplásticos reforçados com diferentes fibras naturais.....	79
Tabela 10 – Materiais utilizados para a produção dos compósitos.	82
Tabela 11 – Características dos componentes, resina epóxi e endurecedor.	85
Tabela 12 – Propriedades do sistema não curado.....	85
Tabela 13 – Propriedades físicas do laminado fornecidas pelo fabricante.....	85
Tabela 14 – Descrição dos grupos ensaiados na primeira fase.	86
Tabela 15 – Massa da resina e tecidos de rami para moldagem dos PRFVeg	89
Tabela 16 – Massa da resina, fibras e tecidos de sisal para moldagem dos PRFVeg.....	89
Tabela 17 – Dimensões das amostras dos laminados de carbono.	94
Tabela 18 – Propriedades utilizadas na modelagem da viga reforçada com PRFC.	98
Tabela 19 – Resultados das diferentes modelagens do reforço no combate ao momento fletor ...	100
Tabela 20 – Descrição dos grupos ensaiados na segunda fase do estudo.	102
Tabela 21 – Caracterização da areia fina.....	104
Tabela 22 – Caracterização da areia média.	104
Tabela 23 – Caracterização da brita basáltica, graduação 9,5/25.....	105
Tabela 24 – Caracterização física do cimento CP IV 32 RS.....	106
Tabela 25 – Materiais utilizados para 1m ³ de concreto.....	107
Tabela 26 – Dimensões das amostras da primeira placa moldada de PRFR para reforço.	112
Tabela 27 – Dimensões das amostras da segunda placa moldada de PRFR para reforço.	112
Tabela 28 – Dimensões das amostras da primeira placa moldada de PRFS para reforço.....	112

Tabela 29 – Dimensões das amostras da segunda placa moldada de PRFS para reforço.	112
Tabela 30 – Características técnicas do adesivo epóxi.....	114
Tabela 31 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração do PRFC.	121
Tabela 32 – Comparação das propriedades mecânicas do presente ensaio e fabricante do PRFC. 122	
Tabela 33 – Teores finais dos compósitos com fibras de sisal.....	123
Tabela 34 – Teores finais dos compósitos com tecidos de sisal.....	123
Tabela 35 – Teores finais dos compósitos com tecidos de rami.	123
Tabela 36 – Massa específica dos compósitos de resina epóxi reforçadas com fibras sintéticas... 123	
Tabela 37 – Propriedades mecânicas da resina epóxi.	124
Tabela 38 – Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de sisal/epóxi.	125
Tabela 39 – Propriedades mecânicas dos compósitos com tecidos de sisal/epóxi.	127
Tabela 40 – Propriedades mecânicas dos compósitos com fios de rami/epóxi.	129
Tabela 41 – Teores finais dos reforços com tecidos de rami.	134
Tabela 42 – Teores finais dos reforços com fibras de sisal.....	135
Tabela 43 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto.	135
Tabela 44 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto.	136
Tabela 45 – Resultado dos ensaios de tração das barras de aço utilizadas na armação das vigas.. 137	
Tabela 46 – Propriedades de resistência à compressão do adesivo epóxi.....	138
Tabela 47 – Comparação da resistência à compressão do adesivo epóxi referente ao presente ensaio e fabricante.	138
Tabela 48 – Esforços e modos de ruptura das vigas prismáticas.	147
Tabela 49 – Comparativo das flechas médias para carregamento igual a 90% da carga de ruptura das vigas de referência.....	150
Tabela 50 – Propriedades físicas e mecânicas utilizadas no dimensionamento da viga.	155
Tabela 51 – Resultados das diferentes modelagens do reforço no combate ao momento fletor. ... 156	
Tabela 52 – Composição de custo do compósito reforçado com tecidos de rami 73%.	157
Tabela 53 – Composição de custo do compósito reforçado com fibras de sisal 73%.....	158
Tabela 54 – Custo do compósito reforçado com fibras de carbono 68%.	158
Tabela 55 – Massa dos compósitos usados no reforço estrutural, custo relativo e incremento na resistência das vigas reforçadas com ancoragem pelo método CSCC.	158
Tabela 56 – Análise da variância entre VRef, RC, RR, RS, RCE, RRE e RSE.....	159
Tabela 57 – Análise da variância entre as vigas RC, RR e RS.	160
Tabela 58 – Análise da variância entre as vigas RCE, RRE e RSE.....	160

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	22
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	22
1.2 OBJETIVO.....	25
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
CAPÍTULO 2 - REVISÃO TEÓRICA	28
2.1 REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	28
2.1.1 REFORÇO POR AUMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL	32
2.1.2 REFORÇO POR MEIO DE PROTENSÃO EXTERNA	35
2.1.3 REFORÇO PELA APLICAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO.....	38
2.1.4 REFORÇO PELA APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	40
2.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS.....	50
2.2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	50
2.2.2 MATRIZES	57
2.2.3 TECIDOS	61
2.2.4 FIBRAS	61
2.2.5 FIBRAS SINTÉTICAS	64
2.2.6 FIBRAS NATURAIS	67
2.2.7 FIBRAS DE SISAL	73
2.2.8 FIBRAS DE RAMI.....	75
2.2.9 CONFORMAÇÃO DE COMPÓSITOS LAMINADOS	76
2.2.10 COMPÓSITOS DE FIBRAS NATURAIS	77
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	82
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	82
3.2 MATERIAIS DOS COMPÓSITOS.....	82
3.2.1 FIBRAS E FIOS.....	83
3.2.2 TECIDOS	83
3.2.3 RESINA.....	84

3.2.4 LAMINADOS DE CARBONO	85
3.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS: FASE – 1	86
3.3.1 PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL	86
3.3.2 PREPARAÇÃO DOS TECIDOS DE RAMI E SISAL	87
3.3.3 PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DOS COMPÓSITOS	88
3.3.4 PREPARAÇÃO E CORTE DAS AMOSTRAS DOS COMPÓSITOS VEGETAIS	90
3.3.5 ENSAIO À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS VEGETAIS	92
3.3.6 ENSAIO À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE CARBONO	93
3.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DAS ESTRUTURAS REFORÇADAS	95
3.4.1 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	95
3.4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO PROGRAMA ANSYS®	97
3.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS COMPÓSITOS COMO REFORÇO: FASE – 2	101
3.5.1 PRODUÇÃO DAS VIGAS	102
3.5.2 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS VEGETAIS PARA REFORÇO	108
3.5.3 COMPOSTO DE PRFC	113
3.5.4 ADESIVO EPÓXI	114
3.5.5 APLICAÇÃO DO REFORÇO NA VIGA	114
3.5.6 INSTRUMENTAÇÃO	118
3.5.7 ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS	119
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES	121

4.1 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES: FASE – 1	121
4.1.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE PRFC	121
4.1.2 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRAS NOS COMPÓSITOS VEGETAIS	122
4.1.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA RESINA EPÓXI	124
4.1.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS VEGETAIS	124
4.2 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES: FASE – 2	134
4.2.1 TEOR DE FIBRAS DO REFORÇO APÓS MOLDAGEM	134
4.2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	135
4.2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AÇO	136
4.2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ADESIVO EPÓXI	137
4.2.5 ENSAIO DAS VIGAS	138
4.2.6 ESFORÇOS GERADOS NAS VIGAS	147
4.3 SIMULAÇÃO DA VIABILIDADE ESTRUTURAL EM UMA SITUAÇÃO REAL	152
4.3.1 DIMENSIONAMENTO	153
4.3.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS VIGAS REFORÇADAS	155
4.4 COMPARAÇÃO DE CUSTOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS COMO REFORÇO	157
4.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS REFORÇOS NA CARGA DE RUPTURA POR ANOVA	159
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	161

5.1 CONCLUSÕES	161
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	163
REFERÊNCIAS	165

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Com o crescente desenvolvimento de materiais e tecnologias, a indústria da construção civil tem como desafio renovar as infraestruturas, atendendo as grandes restrições econômicas. Do ponto de vista ambiental e econômico, é preferível reabilitar uma estrutura à substituí-la por outra, principalmente nas construções que fazem parte do patrimônio histórico. A utilização de reforço estrutural tornou-se um caminho promissor para aumentar a capacidade de carga de estruturas e prolongar sua vida útil (DIMANDE, 2003).

No Brasil, a maior parte das estruturas edificadas foram executadas em concreto armado. Características como, resistência à compressão, facilidade de aplicação e possibilidade de moldagem em uma vasta gama de geometrias, tornaram esse sistema muito atrativo. No entanto, o concreto armado, ao longo do tempo e por exposição a ambientes agressivos, pode sofrer deterioração, sendo de grande importância o planejamento e a manutenção das estruturas ao longo de sua vida útil.

As técnicas usadas nos serviços de reforço e recuperação de estruturas de concreto armado, vêm sendo desenvolvidas desde meados do século XX. Há diversos fatores associados à necessidade de reforçar estruturas de concreto armado. Ainda na fase construtiva, erros na confecção e na execução do concreto, podem colocar em risco a segurança do sistema (DIMANDE, 2003). Erros no projeto, mudança na carga de utilização e alterações nas normas técnicas, podem conduzir a uma releitura da capacidade de carga do elemento estrutural, reduzindo os níveis de segurança e podendo ocasionar em falha estrutural (ARQUEZ, 2010). A ocorrência de eventos sísmicos, tsunamis e outros desastres naturais, impulsionaram as pesquisas de técnicas para a recuperação e reforço de estruturas. A

aplicação de reforço estrutural em casos de incêndios, explosões e colisões, mostrou ser uma estratégia viável e eficiente. (DIMANDE, 2003).

No que diz respeito ao reforço estrutural, diversas técnicas foram desenvolvidas, muitas delas com o intuito de aumentar a capacidade de carga em seu estado limite último. As pesquisas foram direcionadas para obtenção de sistemas que pudessem garantir com excelência os seguintes requisitos: minimização dos efeitos na arquitetura, utilização de materiais leves e com propriedades mecânicas avançadas, durabilidade, simplicidade e rapidez na aplicação (DIAS, 2001). Para atender todos estes quesitos, foi desenvolvido grande número de materiais e metodologias. Começaram a ser utilizados materiais compósitos no reforço estrutural, o qual permite, quando bem executado, o desenvolvimento de sistemas robustos e eficientes. Nas últimas décadas, pesquisas sobre a utilização destes materiais compósitos poliméricos para reforço estrutural cresceram significativamente (MENEGHETTI *et al.*, 2007).

Os procedimentos comumente empregados no reforço e reabilitação de estruturas são: aplicação de resina epóxi em fissuras, vedação elástica superficial, reforço de elementos estruturais com a utilização de concreto, adição de armaduras, cabos de protensão externos, concreto projetado, colagem de perfis metálicos e compósitos poliméricos reforçados com fibras (CPRF) (BEBER *et al.*, 2000; REIS, 1998). Entre as técnicas de reforço citadas acima, a técnica de reforço de elementos estruturais pela colagem de chapas de aço foi reportada em diversos países, sendo conhecida por ter boa relação custo-benefício, ser de fácil execução e por não ocasionar em aumento significativo nas dimensões do elemento estrutural. Porém, as chapas de aço podem sofrer corrosão, comprometendo o desempenho da estrutura, podendo promover um colapso no sistema. Além disso, o peso das chapas de aço pode dificultar o transporte e sua aplicação. (ARQUEZ, 2003).

A implantação dos materiais compósitos na área da construção civil, foi motivada pelo grande sucesso que tiveram nas indústrias automobilística, naval e aeroespacial, em consequência das seguintes características: alta resistência à tração, corrosão e à fadiga, baixo peso específico, facilidade no transporte e utilização (DIAS, 2001). A aplicação destes materiais na Engenharia Civil, foi possibilitada pelo desenvolvimento de compósitos com excelentes propriedades mecânicas e compatibilidade com os materiais usados na construção civil. O desenvolvimento de resinas e a utilização de novos materiais para reforço, tais como, nanotubos e fibras de carbono, permitiram a produção de materiais compósitos com

excelentes propriedades. Na Engenharia Civil, o uso de polímeros reforçados com fibras (PRF) vem crescendo a um ritmo acelerado (TONG *et al.*, 2002).

Os compósitos mais utilizados como reforço estrutural são: os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), fibras de aramida (PRFA) e fibras de vidro (PRFV). O PRFC é considerado a alternativa mais moderna para o reforço de estruturas de concreto. Suas principais vantagens são: a alta relação resistência/peso, alta resistência à corrosão, elevado rigidez e facilidade de execução (FERRARI *et al.*, 2002). O alto custo do material pode ser compensado pelo ganho no tempo de execução, no custo da mão de obra e na diminuição do tempo de interrupção de serviço da estrutura durante o trabalho de recuperação (TENG *et al.*, 2002). Segundo Maier (2005), os compósitos são as opções mais adequadas para atuar como reforço estrutural de pontes, isto devido à resistência aos álcalis e por não estarem sujeitos ao fenômeno de fadiga estática.

Inúmeras razões estabelecem os compósitos reforçados com fibras de carbono como a melhor alternativa para o reforço de estruturas de concreto. Se comparada ao aço, as fibras de carbono podem ser cinco vezes mais leves e apresentam resistência à tração significativamente superior. Tendo em vista uma grande variedade de fibras utilizadas na produção de PRF, as fibras de carbono apresentam elevados valores de módulo de elasticidade e resistência, os quais proporcionam grande rigidez à estrutura, sendo uma ótima escolha para o reforço de estruturas sensíveis ao peso e deslocamento vertical. No entanto, apesar das vantagens e dos excelentes resultados apresentados, pesquisas recentes mostram que a maior parte dos casos à ruptura dos elementos reforçados é prematura. Isto significa que apenas uma pequena parte da elevada resistência das fibras de carbono é aproveitada no sistema. Se associarmos este fator ao custo dos compósitos de carbono, sua implantação como reforço pode ser inviabilizada. Pesquisas recentes sugerem o uso de novas combinações fibra/matriz em função de uma aplicação específica, pretendendo reduzir os altos custos dos elementos de reforço. É importante enfatizar que as combinações fibra-matriz devem apresentar compatibilidade e comportamento mecânico satisfatório (MENEGETTI *et al.*, 2007).

Na busca de alternativas para obtenção de diferentes sistemas compósitos, este trabalho estuda a viabilidade da utilização de compósitos de fibras e tecidos naturais (rami e sisal) em matriz epoxídica, como reforço de estruturas de concreto armado, otimizando o compósito de reforço estrutural e avaliando a resistência à flexão de vigas de concreto armado,

reforçadas com estes sistemas compósitos. Simultaneamente, foram realizadas simulações numéricas utilizando o método de elementos finitos, com a finalidade de conhecer o comportamento da estrutura reforçada e simular o reforço em outros elementos estruturais.

As fibras de rami e sisal estão entre as melhores, em relação a resistência à tração e módulo de elasticidade, podendo resultar em compósitos com excelentes propriedades mecânicas (SOARES, 2012; SOUSA, 2013). A produção e aplicação destas fibras podem gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos. Além de ser um material sustentável, as fibras estão disponíveis a baixo custo, são renováveis, biodegradáveis e abundantes em diversas regiões do país.

A conscientização da preservação ambiental e a utilização de materiais de origem vegetal, em substituição aos materiais plásticos derivados do petróleo, aumentou consideravelmente o interesse em pesquisas sobre a utilização de fibras naturais na construção civil. As propriedades destes compósitos podem ser adaptadas para vários tipos de aplicações, a partir da escolha da fibra, utilizando diferentes matrizes e aditivos, e efetuando tratamentos químico e térmico das fibras (KU *et al.*, 2011). Estudos preliminares sobre aplicações de fibras de rami como reforço de estruturas de concreto armado realizados por Briemel (2013), apontaram como viável à utilização destes materiais como reforço.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da utilização de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras e tecidos de rami e sisal, como reforço de estruturas de concreto armado.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Produzir, caracterizar e comparar o desempenho mecânico dos compósitos de resina epoxídica reforçada com diferentes teores de fibras e tecidos de rami e sisal;

- Aplicar os compósitos que apresentarem melhores propriedades mecânicas como reforço de vigas de concreto armado e comparar seu desempenho;
- Comparar o desempenho dos reforços com os compósitos estudados e o compósito com fibras de carbono;

- Avaliar e comparar o desempenho dos reforços executados pela técnica de colagem na superfície do concreto com um acabamento chanfrado nas laterais e pela técnica de colagem em entalhes na camada de cobrimento do concreto;
- Simular a utilização do reforço estrutural proposto em elementos estruturais de uso comum;
- Comparar custos dos diferentes sistemas de reforços estudados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, onde o capítulo 1 apresenta a introdução do tema, objetivo e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica a respeito do tema, agrupando as principais ideias de vários autores nacionais e internacionais que estudaram sobre o assunto até o momento. Este capítulo está dividido em 2 itens, onde o item 2.1 trata do reforço de estruturas, trabalhando os principais tipos de reforços, os conceitos, método de aplicação, e as patologias que podem ocorrer nestes serviços. No item 2.2 são abordados os conceitos de materiais compósitos, seus constituintes e resultados de pesquisas anteriores sobre os compósitos reforçados com fibras vegetais e sintéticas aplicados na indústria da construção civil.

O capítulo 3 é composto pelo programa experimental, onde foram descritas todas as etapas experimentais realizadas durante a pesquisa, trazendo detalhes de materiais e equipamentos que foram utilizados. Em paralelo ao programa experimental, foram feitas simulações numéricas para analisar as estruturas reforçadas.

Em seguida no capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos e análises da caracterização dos compósitos vegetais, PRFC e ensaios à flexão das vigas reforçadas. Também neste capítulo, foram realizadas simulações numéricas do desempenho do sistema de reforço, com compósitos de fibras vegetais em elementos estruturais de uso comum, avaliando a viabilidade estrutural do sistema comparado ao reforço com compósitos de fibras de carbono. Em seguida, foram comparados os custos dos diferentes sistemas de reforço estudados.

Finalmente no capítulo 5, seguem as considerações finais, conclusões do estudo e algumas propostas para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO TEÓRICA

2.1 REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Com o objetivo de obter um melhor entendimento deste trabalho, serão descritas a seguir, as principais técnicas utilizadas na área de reabilitação de estruturas. Uma solução apontada para o restabelecimento das condições originais ou aumento da capacidade das estruturas, é a utilização de técnicas de recuperação, reparo e reforço de estruturas de concreto. (ANDRADE; SILVA, 2005; SANTOS, 2006).

Segundo Souza e Ripper (1998), a patologia das estruturas é a área da Engenharia Civil que estuda as origens, formas de manifestações, consequências e os mecanismos de ocorrência das falhas e dos processos de deterioração das estruturas.

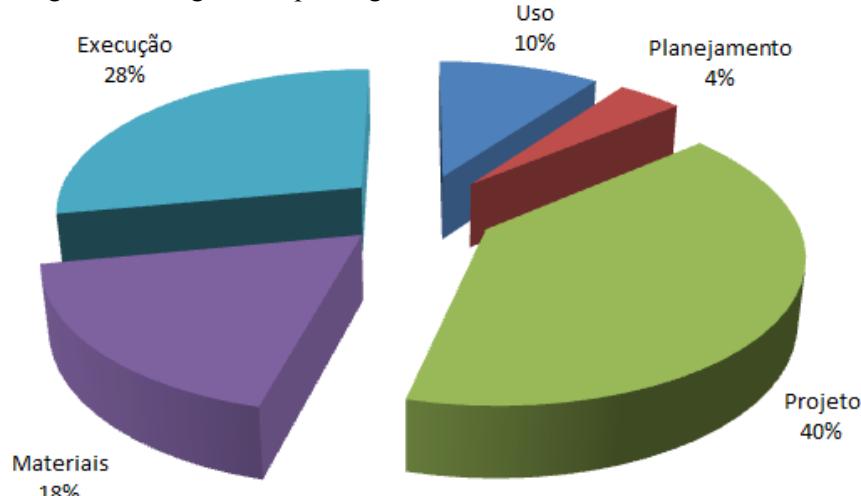
Muitos fatores podem levar a estrutura à deterioração ou perda de seu desempenho, reduzindo seu nível de segurança. Tipicamente ocorre quando o material é exposto à variação das condições climáticas, umidade e exposição a reagentes químicos por longos períodos de tempo. O concreto, por ser um material poroso, facilita a penetração dessas substâncias, estando elas no estado líquido e/ou gasoso, através de poros e fissuras (ABNT NBR 6118, 2014).

Quando as estruturas são construídas corretamente e devidamente protegidas destes fatores, podem durar por grandes períodos de tempo e com manutenção reduzida. A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas, que atuam nas estruturas de concreto, independente das ações mecânicas, variações volumétricas e da retração hidráulica (ABNT NBR 6118, 2014).

As estruturas de concreto podem sofrer diferentes tipos de patologias ao longo do tempo, não só devido aos efeitos ambientais, mas também por falhas humanas cometidas durante as

etapas de concepção, elaboração e execução do projeto, além do uso inapropriado e da falta de manutenção (SANTOS, 2012). Um estudo realizado por Helene (1992) mostra que os problemas patológicos observados na construção civil brasileira podem ser atribuídos ao projeto, execução, materiais, utilização e planejamento. A Figura 1 apresenta as respectivas frações.

Figura 1 – Origem das patologias nas estruturas de concreto no Brasil.



Fonte: Adaptado de HELENE (1992).

Percebe-se que as maiores causas de patologias são referentes aos erros no projeto, execução e materiais. As falhas de projeto e planejamento são consideradas mais graves que as falhas de qualidades dos materiais ou da má execução. É preferível gastar mais tempo no estudo preliminar da estrutura e seu detalhamento do que, por falta de previsão, tomar decisões apressadas ou adaptadas durante a execução (HELENE, 1992).

Assim, projetos bem elaborados e detalhados facilitam sua interpretação, evitando muitas falhas na etapa de execução. É importante que o projeto seja elaborado de forma cuidadosa e detalhada, contendo especificações apropriadas e completas, principalmente com relação aos materiais a serem empregados (BRANDÃO; PINHEIRO, 1999). É fundamental conhecer todas as causas da deterioração e patologias, não apenas para executar reparos exigidos, mas para garantir que após o reparo, a estrutura não volte a apresentar problemas de deterioração (SOUZA; RIPPER, 1998).

Identificada as causas da deterioração da estrutura de concreto armado, mediante diagnóstico, é necessário realizar manutenção corretiva e um procedimento de recuperação deve ser iniciado (HELENE, 1992). Ao planejar a recuperação e reforço em uma estrutura, devem ser analisadas as várias técnicas disponíveis e escolher o melhor tipo de material a

ser utilizado. Os fatores mais importantes para o planejamento são: o tipo de reforço, condições do ambiente, geometria do elemento estrutural, temperatura, umidade, localização, condições de serviço, o tempo de inatividade, suscetibilidade a ataque químico, aparência e tempo de vida útil (WOODSON, 2009). Dentre os diversos materiais disponíveis no mercado, deve-se selecionar o mais conveniente, características como disponibilidade, durabilidade, compatibilidade com o substrato, estabilidade dimensional, permeabilidade, aderência, trabalhabilidade e resistência estrutural devem ser analisadas (REIS, 1998).

O reforço estrutural promove o aumento da resistência estrutural em relação à resistência original. É recomendado quando uma avaliação da estrutura indica que a resistência disponível é insuficiente para atender às necessidades básicas de segurança, podendo acontecer devido ao aumento do carregamento ou mesmo para corrigir uma falha do projeto estrutural, sempre que for feita a avaliação dos carregamentos. Neste caso, o reforço deve ser projetado, de forma que o acréscimo de tensões seja resistido pelo sistema estrutural existente mais o reforço. Para essa situação, as metodologias vão desde o aumento de seções dos elementos estruturais, até a aplicação de reforços externos por meio de proteção ou colagem de chapas de aço (ARYA *et al.*, 2013; ALMEIDA, 2001; LASANTHA, 2012).

A recuperação é entendida pela necessidade de restabelecer a integridade física de um elemento estrutural, buscando devolver as suas condições originais. A recuperação atua na substituição de algo que tenha degradado com o tempo, como por exemplo, o cobrimento da armadura carbonatado em uma estrutura com muitos anos de exposição aos ambientes agressivos. Já o reparo, muito mais simples, porém importante, refere-se à correção de algum defeito surgido na peça estrutural, trazendo de volta a forma arquitetônica. Os reparos são aplicados principalmente a correções de fissuras e ao tratamento de armaduras com focos de corrosão. (LASANTHA, 2012).

Os custos que envolvem reparos costumam apresentar valores inferiores comparados com os de recuperação e reforço, portanto, na maioria das vezes é preferível recorrer a este tipo de intervenção, devido seu baixo custo. Porém, é preciso ter cuidados ao reparar estruturas, pois é imprescindível a realização de um diagnóstico das causas da deterioração antes de proceder com os reparos, e é importante saber o que está acontecendo no interior dos elementos estruturais. Muitas patologias que são contornadas com reparos simples, na verdade são sinais de que a estrutura manifesta problemas mais sérios. Quando a estrutura apresenta algumas falhas visíveis, elas nos alertam que ela está ficando doente e precisa ser

feita alguma intervenção. Não precisa esperar o problema se agravar ao máximo para intervir adequadamente, pois quanto mais cedo for resolvido, menos onerosa será a intervenção (LASANTHA, 2012).

Quando se faz a opção de reforçar uma estrutura, todos os modos de falha devem ser avaliados. Ao reforçar uma estrutura à flexão, pode-se permitir uma falha por cisalhamento. A estrutura em sua totalidade deve ser investigada quando há alteração da integridade estrutural do sistema, e o reforço deve ser designado para aumentar a capacidade resistente, minimizando a manutenção e necessidades de reparo (ALKHRDAJI; THOMAS, 2002).

Os reforços podem ser aplicados em vários níveis e para diferentes sistemas, e a seleção do método e dos materiais de reforço deve considerar o tempo de implementação, sua relação custo-eficácia e disponibilidade de materiais. O passo seguinte é a realização de projeto de engenharia para chegar à estimativa detalhada de custos. As soluções podem ser simples ou complexas. Alguns resultados experimentais disponíveis na literatura mundial podem auxiliar no processo de tomada de decisões sobre os métodos de reforço a serem implementados (TEYMOURIAN *et al.*, 2004).

A reabilitação *in situ* ou reforço de estruturas utilizando chapas de aço, mostrou nas últimas décadas ser um método eficiente e econômico para melhorar a performance de elementos estruturais, e são conhecidos por proporcionar aumentos significativos na flexão e no cisalhamento (ZAMIN *et al.*, 2007). Este método foi amplamente usado no reforço de edifícios e pontes em países como Bélgica, França, Japão, Polônia, Suíça e Reino Unido (JONES *et al.*, 1988). A forma mais comum deste método é a colagem das chapas de aço em posições estratégicas na estrutura, e a eficácia do método depende da preparação da superfície e das interações entre cola, chapas e concreto.

Devido a algumas desvantagens inerentes ao aço, foram estimuladas pesquisas sobre o desenvolvimento de reforços não metálicos de estruturas. O uso de materiais poliméricos reforçados com fibras (PRF), por exemplo, tem proporcionado sistemas de reforço não-corrosivos, versáteis e eficientes. Garden e Hollaway (1998) compararam a performance mecânica e física dos PRF com as chapas de aço, e verificaram que os PRF apresentavam propriedades superiores quando comparados ao aço, particularmente no que diz respeito as resistências à tração e fadiga. Atualmente, diversos materiais são utilizados na confecção de compósitos poliméricos reforçados com fibras, e existe uma grande variedade de fibras

disponíveis. As fibras mais utilizadas para reforço de estrutura são de carbono, vidro e aramida. Uma das maiores desvantagens do uso de PRFC é o elevado custo das fibras de carbono, visto que são produtos importados e com um reduzido número de fornecedores no mundo. A Tabela 1 apresenta os custos desses materiais mais utilizados como reforços de estruturas.

Tabela 1 – Custo de materiais para reforço de estruturas no setor da construção civil.

Material	Custo (\$US/kg)
Fibra contínua de aramida impregnada por resina epóxi	62
Fibra contínua de carbono impregnada por resina epóxi	130
Fibra contínua de vidro tipo E impregnada por resina epóxi	22
Concreto	0,04
Aço doce	2,85

Fonte: Adaptado de CALLISTER (2007).

Nota-se que os compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de carbono apresentam maior custo entre eles, sendo \$US 130,00 o quilograma deste material.

As soluções para o reforço de estruturas de concreto armado podem variar desde a reabilitação de membros danificados à adição de elementos para aumentar a sua capacidade de carga. A seguir serão listadas as técnicas e materiais recentemente utilizados no reforço de estruturas de concreto armado.

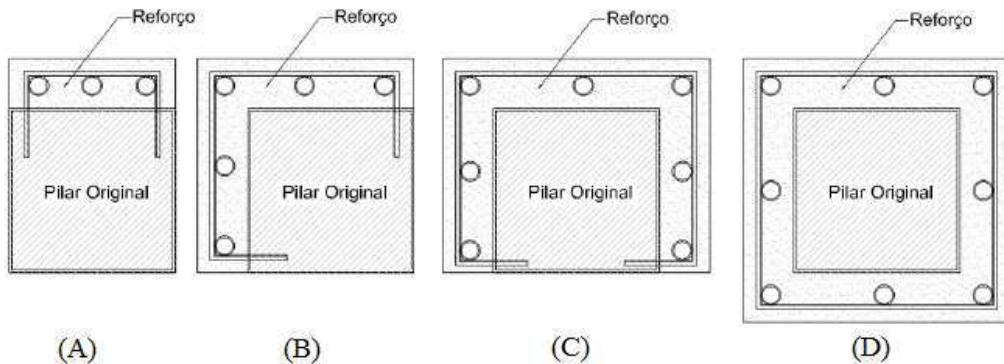
2.1.1 REFORÇO POR AUMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Esta técnica é um dos métodos tradicionais utilizados no reforço de elementos estruturais. Ela consiste na adição de armaduras a um elemento estrutural, para complementação ou reforço, tem a função de restabelecer as condições de desempenho e segurança de estruturas com corrosão das armaduras, atuando no aumento da seção transversal devido ao acréscimo de concreto/argamassa armada aos elementos a serem recuperados. Dessa forma, o material adicionado passará a trabalhar unido ao concreto existente através da aderência entre eles ou por conectores. É garantida a eficiência desse reforço, desde que sejam tomados os devidos cuidados durante sua execução (SANTOS, 2013; REIS, 1998).

Esta técnica de reforço é muito utilizada por profissionais da construção civil, devido suas vantagens econômicas e fácil execução. Porém, trazem desvantagens, como o uso de fôrmas para concretagem e aumento da seção transversal do elemento estrutural, produzindo elementos finais com dimensões superiores às iniciais previstas no projeto e a mobilização da área. (TAKEUTI, 1999; REIS, 1998).

A Figura 2 apresenta configurações usuais do reforço por aumento da seção transversal em pilares, podendo ser realizada de forma parcial ou total. A Figura 3 apresenta a execução deste tipo de reforço (SANTOS, 2013).

Figura 2 – Configurações de reforço com adição de armadura e concreto em pilares, onde (A) reforço em uma face, (B) reforço em 2 faces, (C) reforço em 3 faces, (D) reforço em 4 faces.



Fonte: TAKEUTI (1999).

Figura 3 – Reforço de pilares em 4 faces, por aumento da seção transversal.



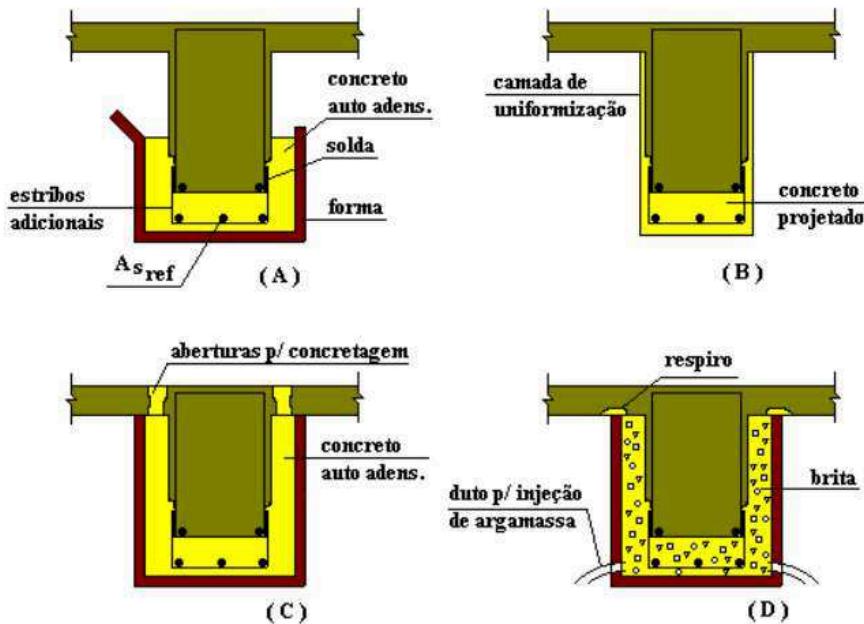
Fonte: Adaptado de HEIZA *et al.* (2014).

Com a corrosão das armaduras, haverá uma redução da área de aço, devendo haver a complementação dessa área perdida pela adição de uma nova área de aço. Segundo Souza e Ripper (1998), deve-se adotar o princípio de complementar uma nova barra de aço caso tenha um redução acima de 15% da área de aço corroída.

O projetista, ao dimensionar a espessura da camada de concreto a ser adicionada à estrutura, deverá levar em consideração a facilidade de execução e dimensão do agregado. Cánovas (1988) sugere não usar espessura inferior a 10 cm, a não ser que se faça uso de concretos com superplastificantes ou concretos projetados, e agregados com diâmetro máximo inferior a 20 mm. Tal espessura contribuirá para que o elemento estrutural tenha a seção necessária para resistir aos esforços.

O reforço por meio do aumento da seção transversal é eficiente para combater os esforços de momento fletor e cortante. Segundo Timerman (2011), esta técnica consiste em reforçar estruturas pela adição de uma nova camada de concreto, microconcreto ou graute, sendo fundamental conhecer o comportamento da estrutura, devido as desvantagens inerentes ao acréscimo às seções originais, acarretando um aumento de sobrecarga, podendo promover outros problemas. A Figura 4 apresenta os tipos de seções de vigas reforçadas à flexão por aumento da seção transversal. Este método pode ser de forma parcial ou total, sendo em (A) o aumento parcial da seção da viga com lançamento do concreto em fôrma de cachimbo, (B) aumento parcial da seção da viga com concreto projetado (com aumento do cobrimento), (C) aumento total da seção da viga através do lançamento do concreto por aberturas em lajes e (D) aumento total da seção da viga com argamassa injetada sobre brita acondicionada nas fôrmas.

Figura 4 – Vigas reforçadas à flexão por aumento da seção transversal.



Fonte: PIANCASTELLI (1997).

Várias técnicas podem ser aplicadas para este tipo de reforço, uma delas é a substituição do concreto convencional por grautes, que apresentam propriedades de retração compensada e elevada resistência à compressão, apresentando ainda como vantagem a possibilidade de rápida desforma.

Canaval e Silva (2016) fizeram uma investigação experimental sobre reforço à flexão com aumento da seção transversal de vigas de concreto armado, na qual foi avaliada a influência do tipo de superfície da interface entre concreto e graute. Esta região da interface é de suma

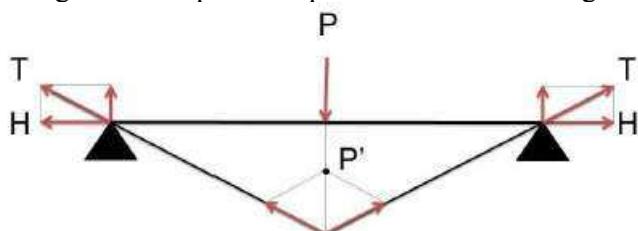
importância para garantir a eficiência do reforço. Tal aderência é necessária para impedir o deslizamento entre as partes de concreto e graute. O autor produziu vigas de concreto armado nas dimensões de 12 cm x 22 cm x 200 cm. As vigas reforçadas tiveram aumento na seção transversal por acréscimo de 5 cm de graute nas laterais e fundo da viga, em uma extensão de 140 cm, simetricamente ao centro do vão. Foram colados na interface entre concreto e graute conectores metálicos, e comparados com as vigas reforçadas com interface lisa. Previamente ao serviço de reforço, todas as vigas foram submetidas à carga de projeto até a estabilização da flecha, posteriormente a carga foi reduzida para 80%, sendo executado o reforço e ensaiadas até a ruptura. O autor observou que, para as vigas reforçadas com superfície lisa, o acréscimo de carga foi de 44% em relação às vigas de referência, e para as vigas com conectores o aumento foi de 47%.

Segundo Santos (2006), as vigas reforçadas por aumento da seção transversal apresentam praticamente os mesmos modos de ruína que as seções de concreto armado sem reforço: escoamento do aço e esmagamento do concreto, desde que garantida a aderência perfeita na ligação do substrato e concreto novo.

2.1.2 REFORÇO POR MEIO DE PROTENSÃO EXTERNA

O reforço por protensão externa consiste em um método de pós-tensão onde cabos são colocados externamente ao elemento estrutural, introduzindo na estrutura um estado prévio de tensões contrárias as provocadas pelas cargas atuantes, reduzindo deformações, flechas e aumentando sua capacidade portante de carga sob diversas condições de carregamento. É um método atrativo na reabilitação e reforço de estruturas, por acrescentar pouco peso na estrutura original, pela simplicidade do método construtivo e por permitir um monitoramento constante, enfatizando a substituição dos cabos. O bom desempenho desta técnica está relacionado ao trabalho bem executado (NORDIN, 2005; SANTOS, 2006). A Figura 5 apresenta o esquema de esforços produzidos pela protensão externa das vigas.

Figura 5 – Esquema de protensão externa da viga.



Fonte: Adaptado de SOUZA E RIPPER (1998).

Segundo Beber (2003), este sistema de reforço traz como desvantagens a sua vulnerabilidade a corrosão eletroquímica, à ação do fogo e atos de vandalismo, podendo ser protegidos através de encapsulamento dos cabos com concreto convencional ou projetado.

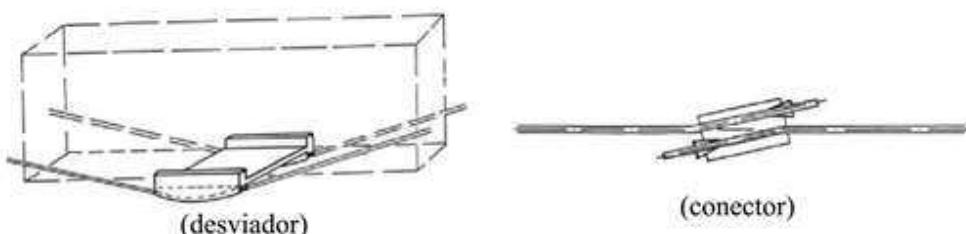
Conforme Santos (2006), esta técnica consiste na aplicação de protensão externa através de barras, fios e cordoalhas, podendo este reforço:

- Reduzir as aberturas de fissuras e flechas;
- Redistribuir esforços em vãos de vigas;
- Suprir deficiências de armaduras internas corroídas;
- Aumentar a capacidade portante das mesmas.

Um dos aspectos mais importantes sobre a protensão é seu caráter ativo, não sendo necessário a deformação da viga para que o reforço comece a atuar sobre ela. O reforço de vigas ou lajes por meio da protensão pode ser utilizado em diversos casos, tais como deterioração ao longo do tempo, acidentes, falhas de projeto e de construção, além de alterações no uso da estrutura. O aumento de rigidez proporcionado pela protensão pode reduzir as flechas e a vibração da estrutura, além de reduzir a variação de tensões, melhorando a resistência à fadiga (ALMEIDA, 2001).

O posicionamento dos cabos podem ser retos ou poligonais. Para que seja feita a transferência de esforços à estrutura, são usados desviadores e conectores, que são dispositivos que forçam o traçado dos cabos a se posicionarem em determinados pontos, auxiliando na deformação de um diagrama de esforços contrários ao solicitante, permitindo que o cabo acompanhe a deformação da peça (KRAMER, 2013 apud PIVATTO, 2014). A Figura 6 apresenta estes dispositivos.

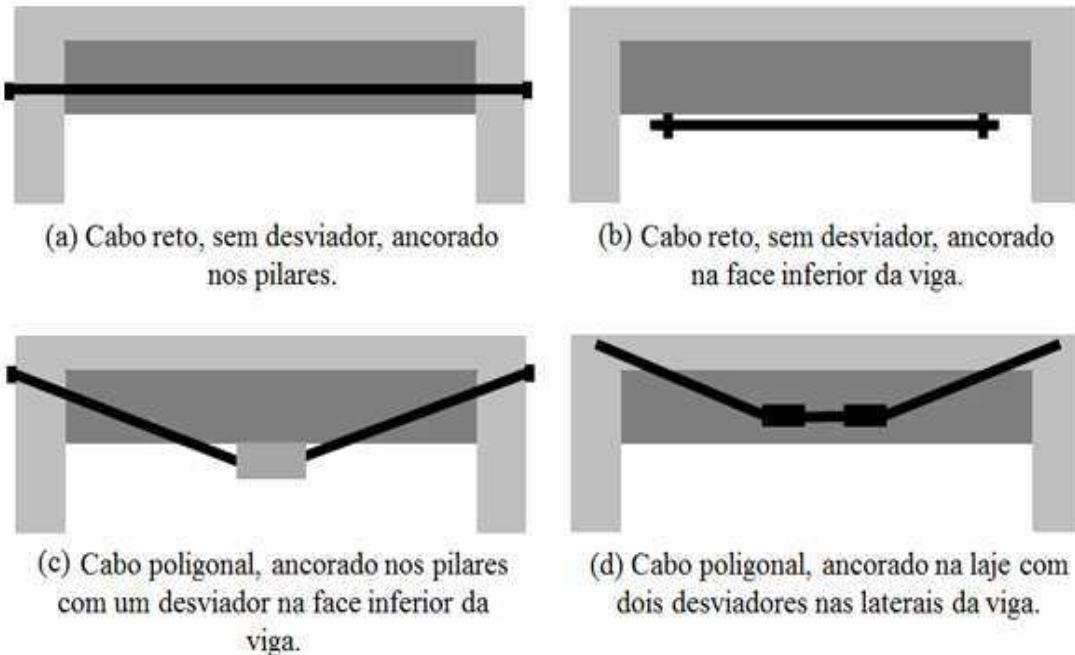
Figura 6 – Desviador e conector usados em reforço de protensão externa.



Fonte: CÁNOVAS (1988) apud SIMÕES (2007).

Almeida (2001) afirma que o uso de cabos retos protendidos é uma alternativa para diminuir abertura de fissuras. Já para reduzir deformações no caso de flechas excessivas, podem ser usadas cabos poligonais e retos. Segundo Romero (2007), os cabos poligonais são muito usados na eliminação de pilares, gerando forças verticais e substituindo os apoios. Os esquemas geométricos e traçados dos cabos de protensão que podem ser utilizados são ilustrados na Figura 7.

Figura 7 – Esquema de geometria e traçados dos cabos de protensão.



Fonte: Adaptado de ALMEIDA (2001).

A Figura 8 apresenta a configuração final de reforço por protensão externa, usando desviadores na face inferior da viga.

Figura 8 – Reforço por protenção externa.



Fonte: Adaptado de Da SILVA E AGOSTINHO (2008).

Segundo Santos (2006), os modos de ruína de vigas reforçadas por protensão externa podem ser por escoamento do aço ou esmagamento do concreto. Outros modos podem surgir, os quais são inerentes do sistema de protensão (encunhamento, relaxação do aço, etc.).

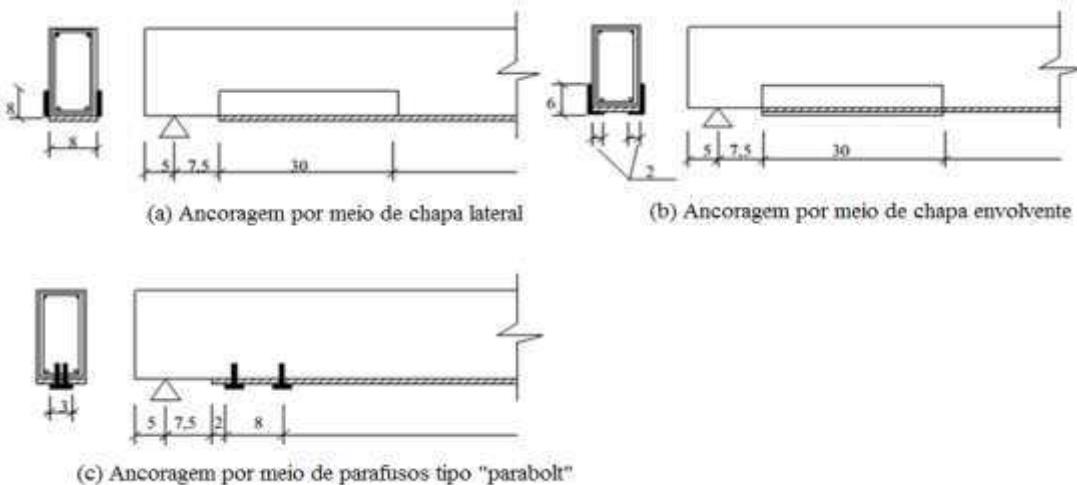
2.1.3 REFORÇO PELA APLICAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO

Os trabalhos pioneiros sobre reforço de concreto armado com chapas de aço são de L’Hermite e Bresson (1967), que reportaram pela primeira vez a colagem de placas de aço com resina epóxi sobre a superfície do elemento de concreto para aumentar sua capacidade de carga. A primeira aplicação com sucesso desta técnica para reforço de pontes foi no Reino Unido na M5 Quinton Interchange em Worcestershire, 1975. A técnica foi aprimorada, e durante os anos 1990 muitos países adotaram este método para reforço estrutural (OLAJUMOKE; DUNDU, 2014; GARDEN; HOLLOWAY, 1998; HOLLOWAY; LEEMING, 2000).

O reforço com placas coladas externamente (PCE) engloba um conjunto de métodos e materiais, é uma técnica aplicada em casos de deficiência nas armaduras existentes, e quando as dimensões estruturais e a qualidade do concreto estão adequadas. É utilizada desde os anos 1960, atualmente é um método muito popular em todo o mundo. A disponibilidade do aço e sua facilidade de aplicação tornaram a utilização desta técnica muito atrativa (OLAJUMOKE; DUNDU, 2014).

O reforço pela adição de chapas de aço consiste na colagem de chapas ou perfis metálicos sobre a superfície do elemento a ser reforçado. Suas vantagens são: rapidez na execução, baixo acréscimo da seção, ausência de vibração, baixo nível de ruídos, a não necessidade de instalações auxiliares e pouca interferência no uso da estrutura durante a execução da reabilitação. As desvantagens são: transporte e manuseio, peso das placas, risco de corrosão na interface entre a ligação aço-adesivo e baixa resistência ao fogo. Em geral, são utilizadas chapas de aço ligadas ao elemento estrutural por colagem com resina epóxi, e a ligação pode ser complementada com buchas metálicas ou estender a chapa até a região onde ela não seja necessária, para evitar o descolamento na região de ancoragem. (APPLETON; GOMES, 1997; CÁNOVAS, 1988; REIS, 1998). A Figura 9 apresenta os métodos de ancoragem que podem ser utilizados.

Figura 9 – Métodos de ancoragem utilizados para reforços com chapas metálicas.

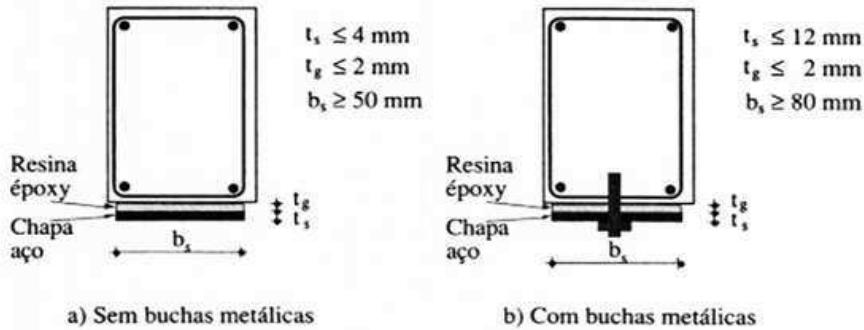


Fonte: CAMPAGNOLO (1993) apud REIS (1998).

Este reforço tem como objetivo suportar novas solicitações de cortante, flexão e torsão. A técnica é conhecida por ser eficiente quando o trabalho é bem executado. É importante promover uma eficiente união da chapa ao elemento a ser reforçado para que as tensões sejam distribuídas e continuem atuando mesmo após o estado limite último (ELU). A utilização de resina epóxi proporciona uma união eficiente entre o aço e concreto. Por ser uma técnica que pode-se adicionar considerável capacidade resistente à peça sem aumento de seção, é considerada adequada para casos onde não são permitidas grandes alterações na geometria da estrutura, além de apresentar uma rápida execução comparada a outras técnicas de reforço (SILVA, 2006; SOUZA; RIPPER, 1998; REIS, 1998). As chapas metálicas podem ser protegidas contra corrosão por meio de galvanização e pinturas de proteção.

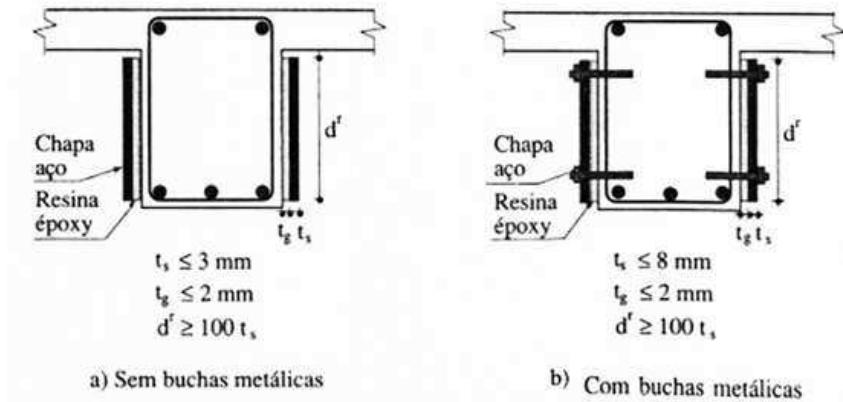
Antes da aplicação do reforço na estrutura, deve ser feita uma preparação da superfície de concreto e das chapas de aço para se obter uma boa ligação entre os materiais. A superfície do concreto deve ser escarificada com um martelo pneumático, para aumentar a rugosidade, e posteriormente limpa. No entanto, uma rugosidade muito elevada pode ser inconveniente, podendo levar a formação de fissuras. Após esse processo, é aplicada uma camada de resina, submetida à pressão constante e leve na chapa contra o concreto, para garantir a ligação entre adesivo, chapa e concreto. A chapa deve ter uma largura um pouco inferior à da viga, cobrindo a extremidades com adesivo para evitar a penetração de água. A espessura de resina deve ser entre 1 a 2 mm, seu excesso pode afetar a capacidade de ligação (GOMES; APPLETON, 1999). A Figura 10 e Figura 11 apresentam as recomendações de dimensionamento das placas para reforço à flexão e cisalhamento em vigas de concreto armado, propostas por Gomes e Appleton (1997).

Figura 10 – Reforço à flexão com chapas de aço ou perfis metálicos.



Fonte: GOMES e APPLETON (1997).

Figura 11 – Reforço ao esforço cortante com chapas de aço ou perfis metálicos.



Fonte: GOMES e APPLETON (1997).

No dimensionamento deste reforço, deve-se conhecer todas as características mecânicas da chapa de aço, como resistência à tração e módulo de elasticidade. A partir destes dados, é determinada a área da seção transversal da chapa metálica, de forma que o elemento estrutural reforçado, se submetida a esforços maiores do que os previstos, atinja a ruína simultaneamente por esmagamento do concreto na zona comprimida e escoamento das barras e chapa de aço, não ocorrendo ruptura na superfície de contato entre chapa/adesivo ou entre adesivo/concreto (REIS, 1998).

2.1.4 REFORÇO PELA APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Recentemente, diversos materiais estão sendo desenvolvidos e utilizados para promover o reforço estrutural em substituição aos perfis metálicos, sendo importante destacar o uso de compósitos poliméricos reforçados com fibras. Os benefícios da substituição do aço pelos PRF podem ser observados na simplicidade de execução, redução de custos de equipamentos, maior rapidez na implementação, baixo peso e por proporcionar estruturas

mais duráveis. Estes materiais podem ser produzidos por diversos métodos, suas propriedades são dependentes da composição do material e orientação de seus constituintes. Os PRF se apresentam como uma alternativa promissora para a indústria da construção civil, são versáteis e apresentam excelente desempenho, podem permitir o desenvolvimento de sistemas menos dispendiosos e com propriedades mecânicas específicas, aumentando a ductilidade das estruturas assim como a capacidade resistente dos elementos estruturais (HEIZA *et al.*, 2014; SILVA; 2006). A Tabela 2 apresenta as principais características dos PRF.

Tabela 2 – Principais características dos PRF.

Baixo peso	Acréscimo muito baixo ao peso da estrutura
Não corrosivo	Grande durabilidade, baixa necessidade de manutenção
Mínima espessura	Mínimo acréscimo nas dimensões dos elementos estruturais
Facilidade na instalação	Economia de custo e redução no tempo de paralização
Fonte única de Suporte	Qualidade garantida pelo uso de componentes integrados

Fonte: adaptado de SILVA (2006).

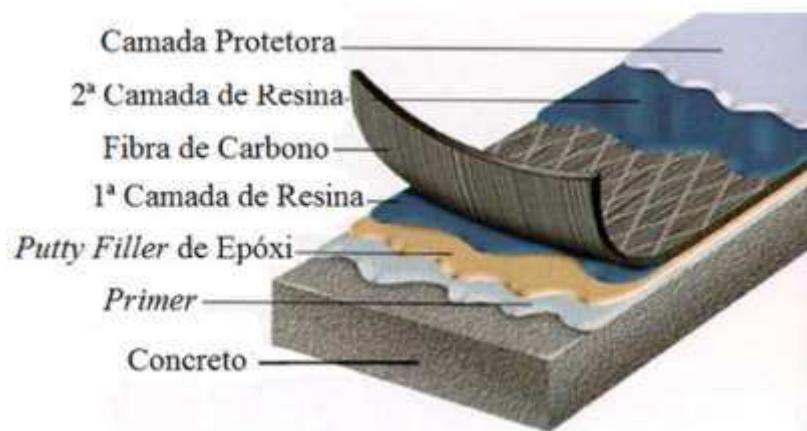
Os trabalhos pioneiros que apontam a substituição de placas de aço por PRF foram realizados na Suíça em 1987 pela EMPA. A operação de reforço consistia na utilização de laminados de compósitos de fibras de carbono com espessura de aproximadamente 1mm ligados a vigas de comprimentos 2000 mm e 7000 mm, utilizando as mesmas resinas epóxi usadas para colagem de chapas metálicas. Em vigas de 2000 mm, a carga última quase dobrou em comparação a uma viga sem reforço, enquanto para vigas de 7000 mm a carga última aumentou 22%. O reforço por PRFC mostrou ser eficiente na redução do comprimento de fissuras e por promover maior distribuição ao longo do comprimento da viga (HOLLOWAY; LEEMING, 2000). Os polímeros reforçados com fibras de carbono foram amplamente utilizados no Japão na década de 90, em ocorrência dos constantes terremotos. As autoridades japonesas optaram por reforçar as construções existentes, principalmente estruturas do sistema viário, como pontes e viadutos com uso de PRFC (SILVA; 2006).

Atualmente, existem no mercado dois tipos de materiais disponíveis para reforço com fibras de carbono, as mantas de fibras de carbono e os laminados pré-fabricados de carbono. Eles se diferenciam pelo fato dos laminados de PRFC serem pré-moldados (resina + fibra), sendo este material já curado/endurecido e comercializado em faixas; enquanto as mantas de fibras de carbono são moldadas *in loco* por impregnação com a resina, sendo comercializadas em mantas.

O procedimento de aplicação desses materiais à estrutura dependerá do tipo de sistema de reforço empregado. No caso dos laminados pré-fabricados, este material é colado na estrutura com um adesivo epóxi, que tem a função de garantir a aderência entre o reforço e o substrato do concreto. Este adesivo é composto por dois componentes, a resina a base de epóxi e um catalizador, a primeira é livre de solventes e tem enchimento mineral. Geralmente, o adesivo mais adequado para aplicação deste reforço é de alta viscosidade, porém, no sistema de reforço com mantas, a função da resina não se restringe somente na aderência mas também na impregnação das fibras, formando a matriz do compósito, sendo adequado a aplicação de resina de baixa viscosidade. O sistema normalmente recorre a resinas de saturação do tipo epóxi, composta por dois componentes devidamente dosados, a resina e o catalisador (BEBER, 2003).

Para a aplicação das mantas de fibras de carbono, é importante a correção de imperfeições na superfície do concreto antes da aplicação do reforço, evitando possíveis concentrações de tensões em pontos localizados, podendo prejudicar a ação do compósito. Para regularização da superfície de concreto, deve ser utilizado putty filler de epóxi com a finalidade de estabelecer uma superfície desempenada contínua, proporcionando a adesão do PRF à superfície do concreto (FORTES, 2000; GAMINO, 2007; GARCEZ, 2007). Na Figura 12 são ilustrados os componentes do sistema compósito de reforço com a manta de carbono.

Figura 12 – Sistema de aplicação do tecido PRFC, com as camadas de saturação de resina.



Fonte: Adaptado de MBT (2004).

Esta técnica tem sido muito utilizada na aplicação de reforço à flexão, cortante e confinamento em diversos elementos estruturais. Os elementos mais adequados para reforço são vigas, lajes, colunas e muros. Estruturas como pontes, edifícios, silos, chaminés e túneis, podem ser reforçadas de forma eficiente com essa técnica. Este reforço é mais comumente

aplicado na parte externa do elemento estrutural na região tracionada (SANTOS, 2003). A Tabela 3 apresenta os tipos de PRF mais adequados para cada situação de reforço.

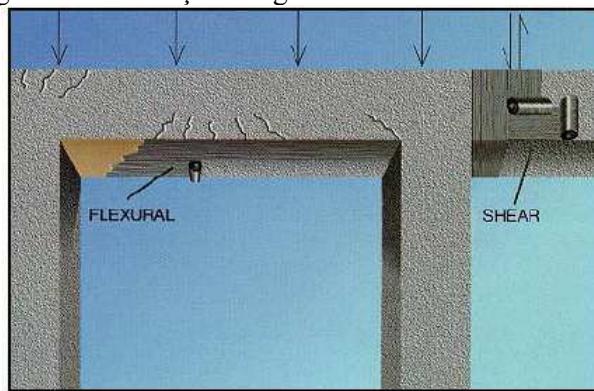
Tabela 3 – Tipo de reforço e os respectivos tipos de PRF usados.

Tipo de reforço	Elemento estrutural a reforçar	Tipo de PRF
Reforço à flexão	Vigas, Lajes, Muros e pilares.	Laminado
Reforço à cortante	Vigas e muros	Manta ou folha
Reforço por confinamento	Pilares, Silos, Tanques e chaminés	

Fonte: GARCIA (2001).

O PRF como reforço de vigas, atua absorvendo esforços de tração provenientes de momentos fletores negativos e positivos, além das tensões tangenciais (cisalhamento), consequentes dos esforços cortantes (MACHADO, 2015). A Figura 13 apresenta o posicionamento do PRF no combate à flexão e cisalhamento em vigas de concreto armado.

Figura 13 – Reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento.



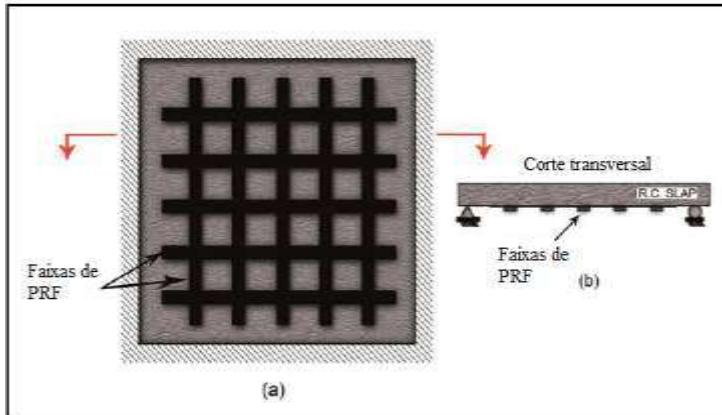
Fonte: MBRACE (1999).

No reforço à flexão, o PRF é posicionado na parte tracionada do elemento estrutural, onde as fibras são orientadas ao longo do eixo longitudinal da estrutura. Para o reforço ao cisalhamento, o PRF é posicionado nos terços da viga, pois as regiões mais afetadas pelos efeitos cisalhantes são próximos aos apoios (SOUZA; CUNHA, 2011).

O procedimento de reforço à flexão em lajes usando compostos PRF é realizado através da colagem de tecidos ou laminados na região tracionada da laje. Os tecidos podem cobrir toda a superfície da peça enquanto os laminados podem cobrir parte da superfície da laje. A cobertura completa da superfície pelo reforço pode criar dificuldades para verificar a qualidade da colagem/aderência, além de impedir o livre movimento de saída da umidade, fatores que combinados, podem promover o processo de descolamento (TENG *et al.*, 2002).

O reforço de lajes é semelhante ao reforço das vigas, porém com PRF posicionado nas duas direções, como ilustrado na Figura 14.

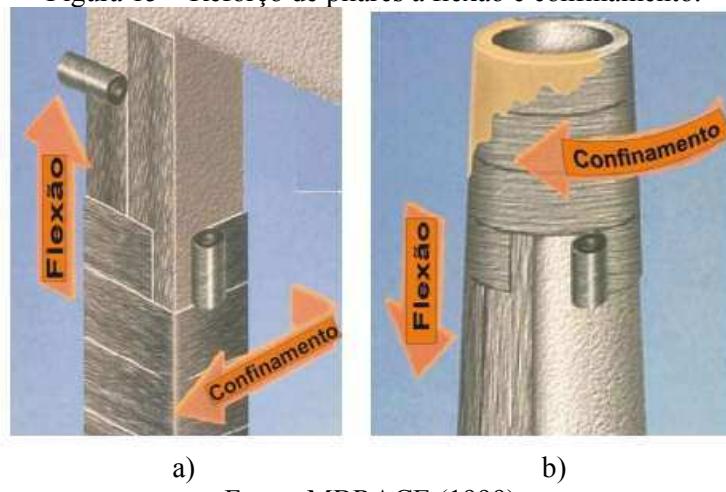
Figura 14 – Lajes de concreto armado reforçadas com sistema de fibras de carbono: (a) vista frontal, (b) vista em corte.



Fonte: HEIZA *et al.* (2014).

O PRF pode ser aplicado em pilares e colunas, com função de melhorar o desempenho desses elementos estruturais. Este reforço pode ser feito de duas maneiras distintas: com o aumento de sua resistência à flexão ou o aumento da sua resistência à compressão axial por meio de confinamento (MACHADO, 2015). A Figura 15 apresenta os dois tipos de reforço, em a) ilustra o reforço à flexão e ao confinamento em colunas e pilares, e em b) apresenta os possíveis reforços em chaminés.

Figura 15 – Reforço de pilares à flexão e confinamento.



Fonte: MBRACE (1999).

O reforço por flexão deve sempre ser realizado previamente aos reforços por cisalhamento e confinamento. Esta sequência de execução tem por objetivo garantir o reforço à flexão e o reforço ao corte, a condição denominada “colagem crítica”, onde é necessária uma aderência adequada entre o concreto e o sistema composto, e para o reforço por confinamento, a

condição denominada de “contato íntimo”, onde as necessidades de aderência entre o sistema composto e o concreto não são mandatórias (MACHADO, 2015).

A Figura 16 apresenta o reforço à flexão em lajes, vigas e transversinas e reforço ao cisalhamento em todas as transversinas do viaduto de Santa Teresa, localizado em Belo Horizonte – MG. O viaduto foi construído em 1927 e tombado pelo patrimônio histórico e cultural de Minas Gerais, o mesmo apresenta um comprimento de 397 metros. A estrutura apresentava ocorrência patológica que exigia sua completa recuperação. A aplicação do reforço com o PRFC permitiu o aumento da capacidade de carga do viaduto elevando à classe 45 tf (MACHADO, 2002).

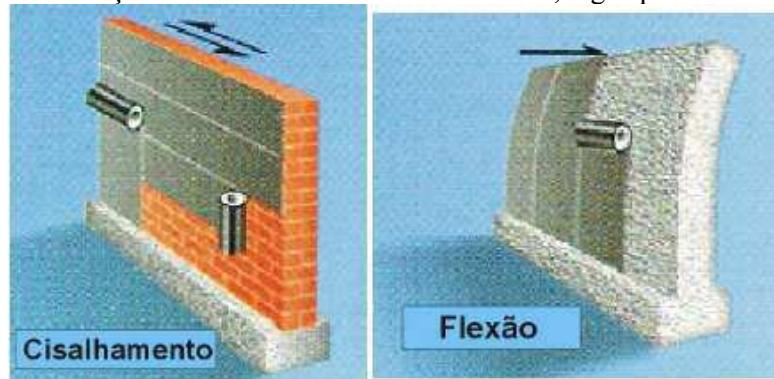
Figura 16 – Reforço de vigas, lajes e transversinas do viaduto de Santa Teresa, em Belo Horizonte – MG.



Fonte: MACHADO (2002).

O PRF também pode ser utilizado no reforço de muros de arrimo, vigas-parede, alvenarias e também promover uma melhoria da resistência a impactos e explosões. Estas estruturas podem ser reforçadas à flexão e ao cortante. Os reforços de alvenaria de tijolos ou blocos de concreto são utilizados como medida preventiva em casas e edifícios de regiões sujeitas a fenômenos naturais e eventos sísmicos e também é eficiente no aumento da resistência ao impacto direto e explosões. Este reforço é executado em diversas camadas de fibras de carbono orientadas, cada uma segundo orientações diferentes, como por exemplo, 0° na primeira, 45° na segunda, -45° para a terceira e 90° para a quarta e assim sucessivamente. As várias camadas de PRF, orientadas segundo direções diferentes, absorvem e diluem as tensões tangenciais antes de transferi-las ao substrato de concreto (MACHADO, 2015). A Figura 17 apresenta o posicionamento do PRF para reforço à flexão e ao cisalhamento em muros e paredes.

Figura 17 – Reforço ao cisalhamento e flexão de muros, vigas-paredes e alvenarias.

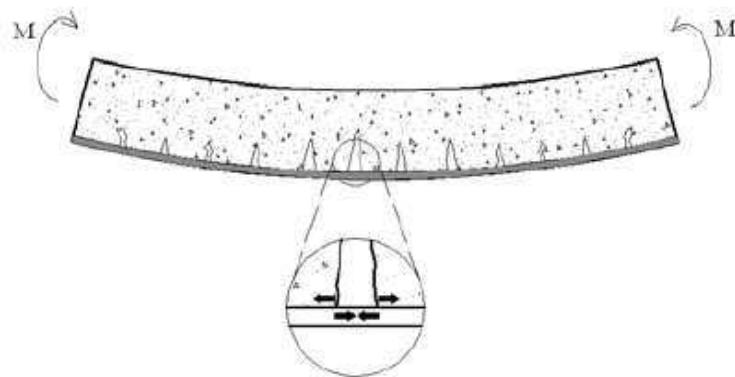


Fonte: MBRACE (1999).

No dimensionamento de PRF para reforço de estruturas de concreto é de suma importância conhecer e identificar os modos de ruptura para analisar o comportamento dos materiais utilizados no reforço e para os critérios de dimensionamento.

Para que a estrutura tenha um aumento em sua capacidade de carga é necessária uma perfeita transferência de esforços entre o PRF e o substrato do concreto. O mecanismo de falha ocorre quando a força resistente de ligação (reforço/estrutura) é superada, ou seja, a perda de aderência. Então, quando uma estrutura reforçada com PRF é solicitada à flexão, ocorre fissuração na região tracionada do elemento estrutural. Nos pontos dessas fissuras o PRF fica altamente tensionado, transferindo estas tensões para as bordas das fissuras ocorrendo um acúmulo de tensão neste local levando o reforço a se destacar, provocando uma ruptura horizontal devido ao aumento imediato da tensão de cisalhamento (MENEGHETTI, 2007; TENG *et al.* 2002). A Figura 18 ilustra este comportamento.

Figura 18 – Transferência de esforços entre concreto e reforço.

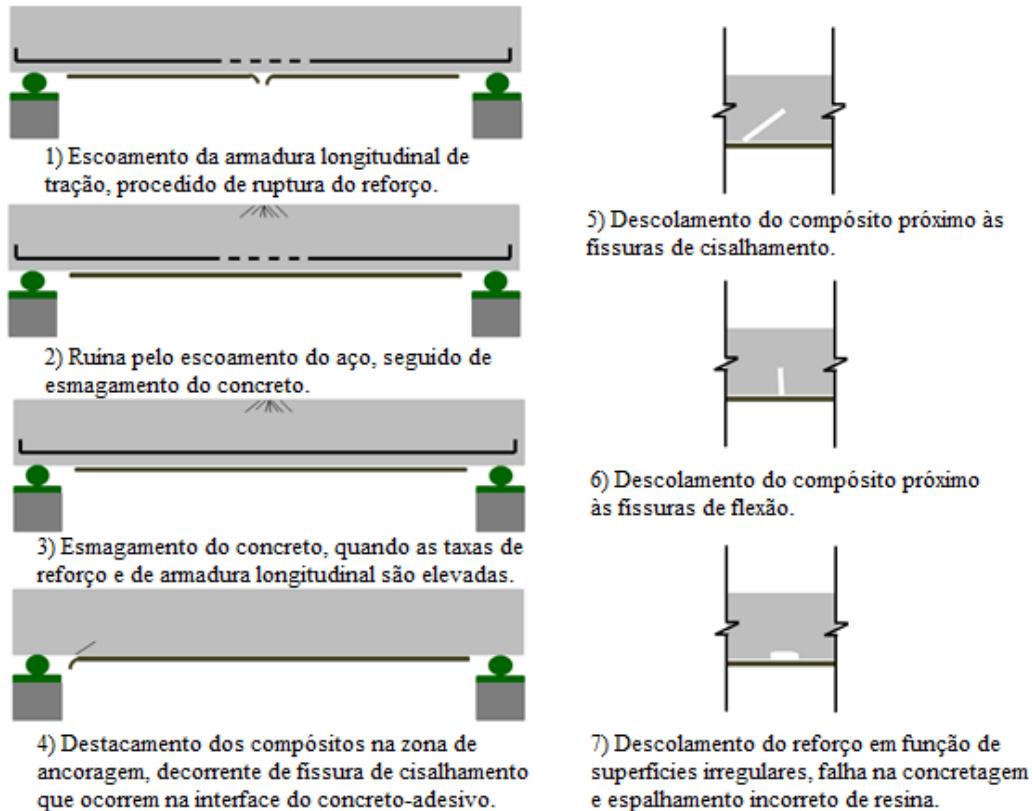


Fonte: MENEGHETTI (2007).

As falhas prematuras em estruturas reforçadas ocorrem devido as altas tensões de interface, sendo elas normais ou cisalhantes. Em caso de falhas por cisalhamento, a propagação de

fissuras no concreto ocorre paralela ao reforço de PRF e adjacentes à interface concreto/reforço, iniciando no ponto de maior tensão e desenvolve até o final do elemento de reforço. (MENEGHETTI, 2007; SILVA SOUZA, 2008). A Figura 19 ilustra os principais mecanismos de ruptura prematura em vigas reforçadas à flexão por colagem de elementos compósitos na superfície tracionada de vigas de concreto armado.

Figura 19 – Modos de ruina em vigas reforçadas à flexão por PRF.



Fonte: Adaptado de TRIANTAFILLOU (1992).

Conforme mostrado na Figura 19, o modo de ruptura 1 ocorre devido à alta resistência do concreto ou baixa resistência da armadura e reforço. O modo 2 é sugerido para o dimensionamento de reforço devido a ductilidade da estrutura antes de sua ruína. O modo 3 ocorre pela alta taxa de reforço e finalmente os modos de ruptura 4, 5, 6 e 7 caracterizam-se pela ruptura brusca e devem ser evitados (SIMÕES, 2007). Nota-se que na última década, houve um aumento considerado do uso de PRF como reforço de estruturas no setor da construção civil. No entanto, a utilização deste reforço apresenta falhas, como por exemplo, o descolamento frágil e prematuro na interface concreto/reforço, diminuindo sua eficiência. Até o presente momento, muitos pesquisadores buscaram aprofundar seus conhecimentos sobre a técnica de colagem do PRF na estrutura em busca de explorar ao máximo a capacidade resistente destes materiais, os quais estão descritos na sequência.

Beber (2003) verificou a viabilidade da utilização de laminados pré-fabricados e mantas flexíveis pré-impregnadas de PRFC no reforço à flexão e ao cisalhamento. Foram analisados os modos e cargas de ruptura, deformações específicas, descolamentos e distribuição de tensões em vigas com seção transversal 15 x 30 cm e comprimento de 300 cm. Enquanto as vigas de controle apresentaram uma ruptura dúctil, o modo de ruptura de todas as vigas reforçadas ocorreu de forma frágil. As vigas reforçadas com o laminado pré-fabricado apresentaram ganho de resistência variando entre 12,5% e 42,8% para as situações de colagem de uma e duas camadas de laminado. A ruptura foi caracterizada pela falha na ancoragem do reforço na interface adesivo/concreto, ocasionada pelo descolamento do reforço. A aplicação das mantas de PRFC apresentaram comportamento distinto, o incremento oscilou entre 25,4% e 78,9%. O modo de ruptura observado nas vigas reforçadas com uma camada de manta flexível aconteceu em decorrência da fissuração excessiva. A aplicação dos PRFC no reforço ao cisalhamento apresentou incrementos de resistência de até 255%.

Meneghetti (2007) analisou a viabilidade e eficiência da utilização de compósitos com fibras de carbono, vidro e aramida no reforço à flexão de vigas utilizando ensaios com carregamento estático. As vigas ensaiadas apresentavam 300 cm de comprimento e seção transversal 15 x 30 cm e o reforço foi dimensionado para aumentar a capacidade de carga em cerca de 25% e 45%. A capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas foi significativamente aumentada, principalmente nas vigas projetadas para ter a capacidade de carga aumentada em 45%, sendo obtido aumento de 83,26% para a vigas reforçadas com PRFC, 49,43% para a vigas com PRFA e 77,90% nas vigas com PRFV. O modo de ruptura de todas as vigas reforçadas se deu pelo descolamento do PRF, com início no vão central da viga, após o escoamento da armadura e antes do esmagamento do concreto. Os resultados experimentais mostraram que a influência do tipo de fibra no reforço das vigas não foi significante no que diz respeito ao incremento de carga, modo de falha e fissuração, uma vez que os reforços das vigas foram dimensionados para promoverem os mesmos incrementos de carga de 25% e 45%. Os resultados experimentais sugerem que os três PRF podem ser utilizados no reforço de estruturas de concreto.

Ferrari e Hanai (2009) verificaram a viabilidade da utilização de compósito de alto desempenho à base de cimento portland e fibras e microfibras de aço destinado a constituir o substrato de transição. Este substrato tem por finalidade controlar a fissuração do concreto

da viga e retardar o desprendimento prematuro do reforço. Foram confeccionadas três vigas de concreto armado com comprimento de 360 cm e seção transversal de 17 x 35 cm, ou seja, uma sem reforço, outra reforçada com três camadas de mantas de fibras de carbono e a última foi demolido o banzo tracionado da viga e em seguida reconstituído aplicando-se compósito cimentício de alto desempenho. Após a cura foram aplicadas três camadas de manta de fibra de carbono e, após os ensaios observou-se que com a presença do reforço houve um aumento da capacidade de carga de ambas as vigas reforçadas, tendo um acréscimo de 19,8% para a viga de concreto armado reforçada e 66,2% para a viga reconstituída e reforçada.

Pesquisas mostram que a colagem de PRF sobre a superfície tracionada das vigas reforçadas à flexão foi muito eficiente em termos de aumento da capacidade de carga, porém alguns problemas foram identificados, como a ruptura prematura por destacamento ou descolamento do reforço, trazendo problemas extremamente indesejáveis, pois estas falhas ocorrem sem aviso, antecipando a ruína da viga reforçada e impossibilitando o total aproveitamento da elevada resistência dos compósitos. Para tal problemática os pesquisadores têm procurado encontrar soluções para resolver este empasse, propondo alguns detalhes executivos para melhorar a ancoragem do reforço na estrutura, afim de conseguir explorar o seu potencial máximo. A nova técnica baseada na inserção dos PRF na camada de cobrimento de concreto, conhecida pelo termo Near Surface Mounted (NSM), tem sido objeto de estudo devido às inúmeras vantagens, como constatado por Castro (2005), Menon *et. al* (2008) e Arquez (2010).

Castro (2005) produziu vigas de concreto armado com seção transversal “T” reforçadas à flexão com a colagem do reforço em entalhes no cobrimento do concreto (CEC), comparado com a colagem de tecidos de PRF na superfície do concreto (CSC). Foram utilizados diferentes tipos de PRF como reforço: barras de fibras de carbono e vidro, tecidos de fibras de carbono, tiras de laminados de carbono e barras de aço. As vigas foram divididas em dois grupos, em função da taxa de armadura longitudinal ($\rho=0,63\%$ e $1,57\%$). Os resultados mostraram que as vigas reforçadas com PRF coladas pela técnica de CEC tiveram cargas últimas mais elevadas do que a técnica CSC, no caso das vigas com menor taxa de armadura. Os modos de ruptura das vigas foram frágeis para ambas as técnicas de ancoragem, envolvendo destacamento, descolamento e ruptura do reforço.

Menon *et. al* (2008) avaliaram o reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado com dimensões de (120 x 250 x 2500) mm tendo o PRF ancorado por duas técnicas. Na primeira

fez-se uma ranhura no concreto de cobrimento da viga com 5 mm de largura e 15 mm de profundidade e posteriormente inseriu-se o laminado na direção de sua espessura. Na segunda técnica foi feito um entalhe na camada de cobrimento do concreto na forma de uma pequena faixa com 150 mm de largura e posteriormente foi inserido o laminado na direção da sua largura. Os resultados mostraram que a melhor técnica de ancoragem foi para os laminados inseridos na sua espessura, apresentando alta eficiência, não ocorrendo o desprendimento do reforço e proporcionando uma alta capacidade resistente ao cisalhamento, podendo também proporcionar o confinamento do concreto, resultando em um aumento na capacidade de deformação. O incremento de carga das vigas reforçadas em relação as vigas de referência foi de 65% para as vigas com o reforço embutido na direção de sua espessura e 52% para o reforço embutido na direção da largura do PRF.

Arquez (2010) realizou ensaios à flexão em corpos de prova prismáticos de concreto sem armaduras, reforçados com fibras de aço, e em seu banho inferior foram feitos entalhes com profundidade de 1,8 cm e neles inseridos na direção de sua espessura laminados de PRFC para avaliar o conjunto concreto/resina/laminado. A profundidade do entalhe foi inferior à largura do laminado, permitindo que parte do PRFC ficasse exposto. Após os ensaios verificou-se que as falhas ocorreram entre o laminado e a resina, isso aconteceu devido a redução da área de aderência possibilitando o deslizamento do laminado. A resina como apresenta resistência inferior ao do laminado, tem uma responsabilidade estrutural muito grande, ficando responsável por absorver as deformações do sistema e garantir a aderência do conjunto laminado/resina/concreto. Como o comprimento de ancoragem foi inferior ao necessário, a força de aderência foi insuficiente, levando o desprendimento do laminado e a falha do reforço. Já a falha na interface entre concreto e resina é bem menor, pelo fato do concreto apresentar módulo de elasticidade parecido com a da resina. Caso isso ocorra, o colapso seria por falhas no concreto ou pela má aplicação da resina e formação de bolhas, fazendo com que o laminado mal seja solicitado.

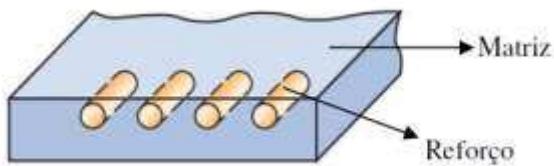
2.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

2.2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito pode ser definido como uma combinação de dois ou mais materiais, que resultam em um novo material com propriedades superiores aos componentes isolados, conservando para cada material suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. Os

compósitos poliméricos fibrosos são materiais heterogêneos, geralmente constituídos por duas fases, sendo uma contínua (matriz) e outra descontínua (reforço). A matriz tem a função de garantir a coesão, proteção e orientação do material de reforço, além de transmitir a ele as solicitações às quais as peças estão submetidas. A fase de reforço proporciona a resistência e rigidez ao composto. O reforço é normalmente composto por fibras ou partículas de geometria variada. Compósitos de partículas tendem a ser mais fracos e menos dúcteis do que compósitos de fibras contínuas, mas são geralmente menos dispendiosos (CAMPBELL, 2010; CHAVES, 2010; ISAIA, 2007). A Figura 20 ilustra a distribuição dos componentes de um compósito polimérico fibroso constituído por duas fases.

Figura 20 – Componentes de um material compósito fibroso.



Fonte: CALLISTER (2002).

A interface dos materiais é a camada que divide as fases distintas como fibras e matriz. Nesta região ocorre as transferências de tensões e deformações de um material para o outro, possibilitando a contribuição de ambos para a resistência do compósito. Portanto, a interface entre dois ou mais materiais deve ser suficientemente resistente para promover a perfeita transferência de tensões e deformações (TITA, 2002).

Compósitos poliméricos apresentaram crescimento significativo nas indústrias aeroespacial, naval e automobilística, durante as últimas décadas, por serem propriedades como elevada resistência e rigidez, baixa densidade, alta resistência à fadiga, alto amortecimento e baixo coeficiente térmico. Recentemente, a indústria da construção civil começou a perceber o potencial de compósitos como material de reforço para muitos problemas associados à deterioração de infraestruturas. Esse crescimento foi impulsionado em 1960 com a produção de resinas específicas, catalisadores e aceleradores. Durante as últimas décadas, um aumento significativo na aplicação de PRFC foi observado na indústria da construção civil, e estes materiais começaram a atuar como um substituto para o aço convencional em estruturas de concreto armado (HOLLOWAY, 2003).

A aplicação destes compósitos como reforço estrutural, acompanhados de adesivos à base de resina epóxi em elementos de concreto armado, começaram a ser utilizados como técnica

de reforço à flexão na década de 80. As vantagens mais significativas sobre a substituição das chapas metálicas para os PRFC, como salientado anteriormente, são sua elevada relação resistência/peso, durabilidade, facilidade de instalação, flexibilidade de formas e a neutralidade eletromagnética (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007).

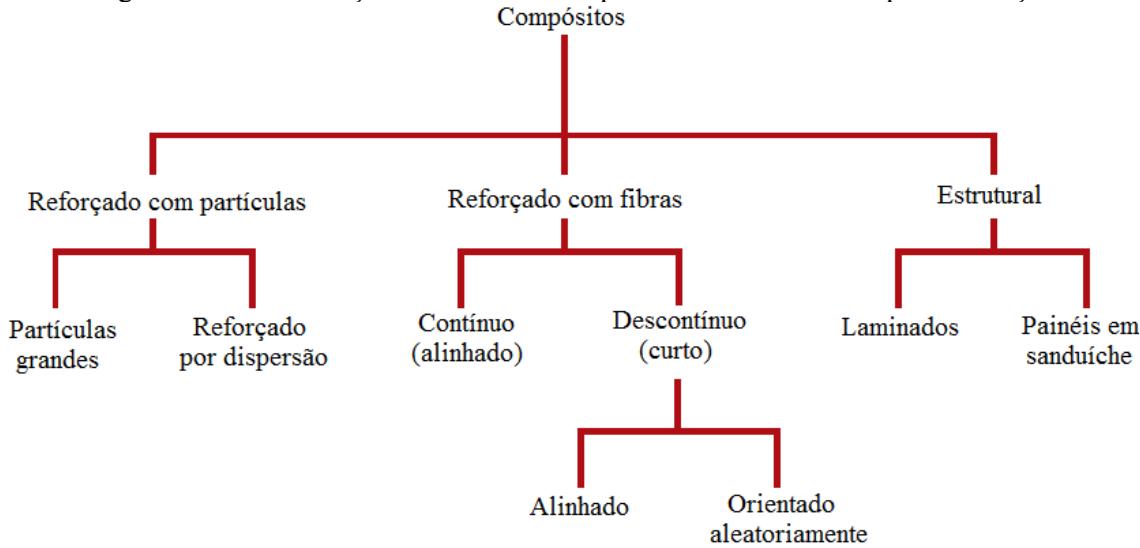
A aplicabilidade dos compósitos reforçados com fibras em estruturas de concreto tem sido frequentemente estudada em vários laboratórios de pesquisa ao redor do mundo. Os reforços feitos com PRFC oferecem um grande número de vantagens, no entanto, apresentam valores relativamente baixos de resposta elástico linear em tensão até a falha e resistência ao cisalhamento. Apresentam também baixa resistência ao fogo, quando expostas a temperaturas elevadas, perdendo resistência significativa na flexão, também sendo sensíveis a efeitos de resistência à ruptura. Além disso, seus custos são relativamente elevados em comparação com outras técnicas de reforço, em especial as chapas de aço (MASUELI, 2013).

Devido ao alto custo do PRFC, pesquisas de compósitos poliméricos fazendo uso de reforço vegetal, têm sido desenvolvidas, como sisal, rami, curauá, dentre outras. Esses materiais despertaram o interesse de pesquisadores por serem oriundos de fontes renováveis, biodegradáveis e por apresentarem baixo desgaste superficial, boa resistência mecânica, baixa densidade, baixo custo e por serem bons em isolamento térmico, elétrico e acústico. (MILANESE, 2008; SOUZA, 2013).

A tecnologia de materiais compósitos explora os altos módulos específicos e a força de fibras de reforço, para produzir um sistema de baixa densidade e de alto desempenho. Para aplicações de engenharia, a anisotropia de forma unidirecional dos materiais de reforço é de crucial importância, sendo necessário o desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas para alinhar as fibras na direção de interesse. O empilhamento de folhas fibrosas pré-impregnadas pode ser usado para produzir laminados (ALIPPI; MAYER, 2012).

Segundo Matthews e Rawlings (1999), a classificação dos materiais compósitos está relacionada com o tipo de matriz, natureza, geometria e orientação do material de reforço. As matrizes são classificadas em poliméricas, cerâmicas ou metálicas. A Figura 21 apresenta a classificação de materiais compósitos em relação ao tipo de reforço.

Figura 21 – Classificação de materiais compósitos relacionado ao tipo de reforço.

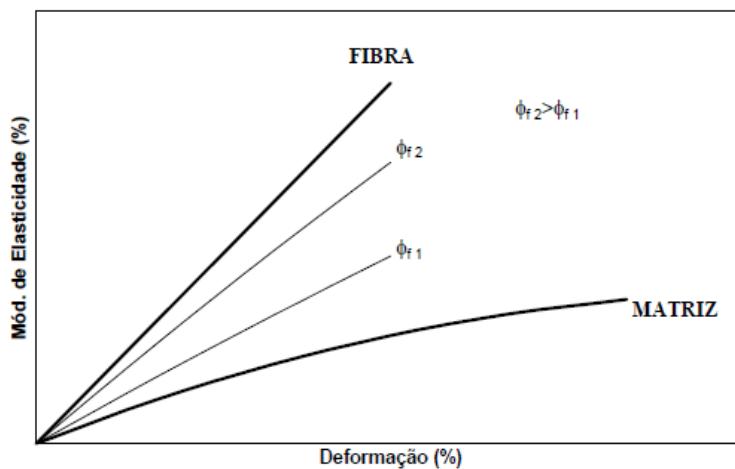


Fonte: CALLISTER (2007).

Apesar das resinas e fibras apresentarem elevado custo, os equipamentos e a mão de obra para sua instalação, comparados com os sistemas de reforço convencionais são baixos. Além disso, esses sistemas compósitos possibilitam sua aplicação em áreas de difícil acesso, e também há possibilidade da execução do reforço sem que sejam paralisadas as atividades exercidas sobre as estruturas, como no caso de hospitais, fábricas e pontes. Portanto, materiais compósitos reforçados com fibras imersas em resinas poliméricas, é uma alternativa de materiais e técnicas viáveis para reforço de estruturas de concreto armado (MACHADO, 2005).

Muitas das propriedades desses compósitos reforçados com fibras são fortemente dependentes da estrutura geométrica do material, das características dos materiais componentes, arranjo das fibras, proporção entre os materiais e características da interface. Ainda, estas propriedades estão relacionadas com uma combinação entre as propriedades da matriz, das fibras e das interfaces entre fibra e matriz. A eficiência mecânica dos compósitos depende exclusivamente da maximização do teor de fibras em relação ao teor de resina, pois as fibras possuem propriedades mecânicas superiores às matrizes. Desta forma, é importante sempre produzir compósitos com o máximo de fibras possível, para que se possa apresentar um desempenho mecânico satisfatório com o mínimo de peso e volume. (CARVALHO, 2005). A Figura 22 apresenta a variação do módulo de elasticidade em função de diferentes teores de fibras. Pode-se notar que, quanto maior o teor de fibras, mais o comportamento do compósito se aproximará do comportamento das fibras.

Figura 22 – Variação do módulo de elasticidade em função de diferentes teores de fibras.



Fonte: CARVALHO (2005)

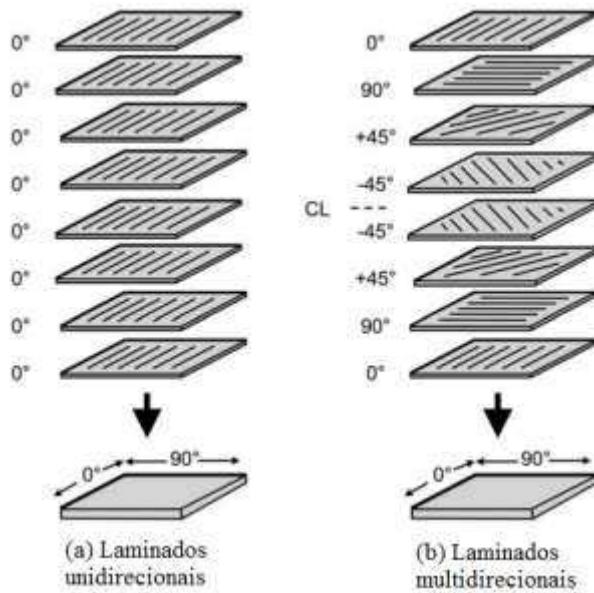
Nos materiais compósitos existe um limite do teor de fibras, podendo o limite máximo ser estimado pelo empacotamento máximo de fibras em seções unitárias. O limite mínimo de incorporação de fibras é estabelecido por critérios de desempenho mecânico, porém, se o teor de fibras for insuficiente, a matriz será responsável pela grande parte da resistência, fazendo com que a ruptura seja definida pelo comportamento da matriz (CARVALHO, 2005).

O arranjo das fibras em materiais compósitos influencia o comportamento do elemento estrutural, podendo ser classificados conforme a orientação (orientada ou aleatória), as dimensões (curtas ou longas) e a maneira pela qual as fibras estão unidas. As fibras longas permitem tanto arranjos aleatórios como orientados, enquanto as fibras curtas permitem apenas arranjos aleatórios. Os arranjos aleatórios são produzidos com mantas, enquanto os arranjos orientados são obtidos com tecidos, mechas ou fios. As fibras de sisal, por exemplo, são de origens longas e seu uso para fabricação de cordas facilitam uso de arranjos orientados, enquanto o uso de fibras curtas de sisal exige seu fracionamento (CARVALHO, 2005).

Os compósitos laminados unidirecionais são materiais geralmente utilizados no reforço de estruturas de concreto. O emprego deste tipo de compósito deve-se à possibilidade de orientar as fibras de reforço nas direções que ocorrem as necessidades de reforço (CARVALHO, 2005). Estes compósitos exibem ótima performance, são produzidos pelo empilhamento de camadas unidirecionais de um material, com orientação e espessura controladas. Para o estudo das propriedades elásticas dos laminados, cada lâmina deve ser considerada homogênea, ou seja, o arranjo, distribuição e o teor das fibras devem ser

uniformes. As fibras devem ser contínuas ou apresentar comprimento longo, podendo ser alinhadas em uma ou mais direções. Nas lâminas unidirecionais, as fibras devem estar alinhadas em paralelo (ALIPPI; MAYER, 2012). A Figura 23 apresenta a produção de compósitos laminados unidirecionais e multidirecionais, sendo em (a) pelo empilhamento de lâminas em ângulo de 0° , e em (b) pelo empilhamento de lâminas em ângulos de 0° , 45° , -45° e 90° .

Figura 23 – Laminados unidirecionais e multidirecionais.



Fonte: CAMPBELL (2010).

A formulação de modelos matemáticos para o estudo das propriedades elásticas de lâminas unidirecionais geralmente considera arranjos hexagonais e rede quadrada simétricos, considerando fibras com seção transversal e diâmetros semelhantes, enquanto os laminados são considerados corpos ortotrópicos com três planos mutuamente perpendiculares. Muitas técnicas podem ser utilizadas para produção e manufatura de laminados. As fibras podem ser secas e impregnadas por resinas em moldes. Atualmente, a produção manufaturada de placas e tecidos pré-impregnados para aplicação na construção civil vem crescendo, assim como as pesquisas sobre diferentes materiais para sua produção. Estes materiais geralmente contém uma resina parcialmente curada e uma distribuição uniforme das fibras unidirecionais, podendo ser compactados sob condições de temperatura e pressão específicas (ALIPPI; MAYER, 2012).

A Equação 1 apresenta um modelo de associação paralela das fibras para estimativa do módulo de elasticidade do compósito (CARVALHO, 2005).

$$E_c = \eta_1 \times \eta_2 \times E_f \times \phi_f + E_m \times (1 - \phi_f) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

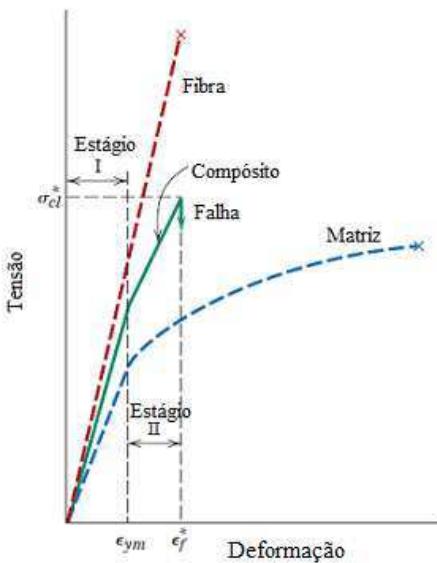
- η_1 , coeficiente que depende da orientação das fibras; varia entre 1 para as fibras orientadas e 1/6 para uma distribuição aleatória.
- η_2 , coeficiente que depende do comprimento das fibras e do comprimento crítico l_c .
- E_f , módulo de elasticidade das fibras.
- ϕ_f , fração volumétrica de fibras.
- E_m , módulo de elasticidade da matriz.
- E_c , módulo de elasticidade do compósito.

A Equação 1 revela a importância do comprimento das fibras (η_2) e de sua orientação (η_1). O comprimento crítico (l_c) é o comprimento mínimo das fibras necessário para obter uma boa aderência entre a fibra e a matriz.

Segundo Carvalho (2005), compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais alinhadas unidirecionalmente, ao serem submetidos aos esforços de tração, o início da falha começa pela ruptura das fibras nas seções menos resistentes, havendo assim uma redistribuição das tensões entre as demais fibras através da matriz. Com o aumento gradual das tensões, ocorre a ruptura de novas fibras, o que resulta na ruptura do compósito. A Figura 24 apresenta o comportamento destes materiais compósitos reforçados com fibras alinhadas e seus diferentes estágios até a ruptura.

- Nas deformações iniciais, a matriz e fibras se deformam elasticamente, apresentando comportamento elástico, o qual é observado no estágio I;
- Após um aumento de carga, a matriz passa ao regime de deformações plásticas ou não lineares;
- Se as fibras forem dúcteis, também passam ao regime de deformações plásticas; se forem frágeis este estágio não é observado.
- A ruptura das fibras e consequentemente a ruptura do compósito.

Figura 24 – Diagrama tensão x deformação de compósitos reforçados com fibras alinhadas.



Fonte: CALLISTER (2007).

2.2.2 MATRIZES

Como salientado anteriormente, a matriz de um material compósito tem a função de transmitir as tensões e conectar os elementos de reforço, além disso, as matrizes desempenham um papel de proteção a ataques químicos, choques mecânicos e ações do meio ambiente (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007).

Os materiais mais utilizados como matrizes em compósitos com aplicação na indústria da construção civil são os polímeros e cimentícios. Devido à facilidade de execução e suas excelentes propriedades, estes materiais têm sido amplamente utilizados na confecção e desenvolvimento de compósitos. Os polímeros podem ser combinados com vários agentes para melhorar, ou de algum modo, alterar as propriedades do material. Os polímeros são diferentes de outros materiais utilizados na construção como cerâmica e metal, devido sua natureza macromolecular. A estrutura da cadeia, composição química e o peso molecular determinam suas propriedades. O peso molecular determina a resistência mecânica, e os pesos moleculares elevados melhoram a elongação de ruptura, resistência ao impacto e ao desgaste, podendo também aumentar o cisalhamento e viscosidade, tornando o polímero não processável (MASUELLI, 2013).

Dentre as propriedades e características mais importantes dos polímeros, estão o baixo peso específico, resistência à corrosão, resistência elétrica, baixa condutividade térmica, propriedades óticas, conformabilidade e acabamento superficial. Em comparação aos metais,

a resistência mecânica dos polímeros é relativamente inferior, mas considerando sua baixa densidade, ele apresenta elevada resistência específica. Para aplicação como matriz em compósitos, os dois principais grupos de polímeros utilizados são os termofixos e termoplásticos (LUKKASSEN; MEIDELL, 2007).

Os termofixos são produzidos pela ligação cruzada entre moléculas de cadeia longa e alto peso molecular, processo irreversível, onde o material se torna permanentemente endurecido, sendo mais resistentes e mais rígidos que os termoplásticos, porém apresentam menor ductilidade e propriedades de impacto inferiores. Estes plásticos podem resistir ao desgaste e ataque de produtos químicos, são muito duráveis, mesmo quando expostos a ambientes extremos. Termofixos podem ser produzidos em uma vasta gama de geometrias, são compatíveis com a maioria dos outros materiais, são excelentes adesivos e agentes de ligação, são amplamente utilizados para confecção de materiais compósitos com aplicação na engenharia civil. Apresentam natureza isotrópica, não efetuam o processo de cura quando isolados, necessitando de um segundo componente, o endurecedor. No estado endurecido, estas resinas não podem ser fundidas ou amolecidas pelo calor, entrando em combustão e se decompondo quando atingido seu limite de temperatura. As resinas termofixas mais utilizadas no desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras são: resinas de poliéster, fenólicas, epoxídicas e éster vinílico (FAA, 2012; LUKKASSEN; MEIDELL, 2007; ALIPPI; MAYER, 2012; TAJ *et al.*, 2007). A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas das resinas termofixas mais usadas.

Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas de resinas termofixas.

Matrizes termofixas				
Propriedades	Poliéster	Epóxi	Éster vinílico	Fenólico
Densidade (g/cm ³)	1,0-1,5	1,1-1,6	1,2-1,4	1,29
Módulo de elasticidade (GPa)	2,0-4,5	3,0-6,0	3,1-3,8	2,8-4,8
Resistência à tração (MPa)	40-90	28-100	69-86	35-62
Alongamento à ruptura - Modo de tração (%)	2,6	1-6	4-7	1,5-2
Resistência à compressão (MPa)	90-250	100-200	86	210-360
Absorção de água - 24h a 20°C (%)	0,1-0,3	0,1-0,4	0,05-0,6	0,1-0,36
Temperatura de cura (°C)	25-200	25-200	25-150	25-200
Custo (US\$/kg)	1,5-4,0	3,00-20,00	3,20-6,40	6,50-12,00

Fonte: PEREIRA *et al.* (2015).

Os poliésteres insaturados apresentam uma vasta gama de propriedades e aplicações. Este material tem como vantagens a capacidade de cura a temperatura ambiente, boas

propriedades mecânicas, transparência, além de ser produzido em grande escala (TAJ *et al.*, 2007). As resinas epoxídicas utilizadas para compósitos de alto desempenho apresentam alta resistência mecânica e à degradação ambiental. As maiores vantagens das resinas epoxídicas são: a excelente resistência à tração, módulo de elasticidade, resistência à fluência, resistência química e aos solventes, forte adesão com as fibras e baixa retração durante a cura. O custo e o longo período de cura são as desvantagens. Além disso, elevadas temperaturas podem comprometer a resina epóxi, sofrendo reduções consideráveis de resistência (ARAÚJO, 2002). As resinas de éster de vinilo apresentam excelentes propriedades, como resistência corrosiva, química e térmica, apresentando maior facilidade de processamento e menor tempo de cura. A resina fenólica é utilizada principalmente quando a alta resistência ao fogo é requerida, e isto está associado ao fato da resina manter as suas propriedades a temperaturas elevadas (MOHANTY *et al.*, 2005).

Os termoplásticos são polímeros que, por meio de processos de aquecimento e resfriamento, podem ser moldados diversas vezes, permitindo serem recuperados e reciclados. Isto ocorre devido estas resinas possuírem uma estrutura molecular linear que, com um aumento de temperatura, enfraquece as ligações secundárias entre as moléculas, permitindo sua movimentação. Essas resinas apresentam ainda boa relação custo-benefício, estabilidade em elevadas temperaturas em condições úmidas, são dúcteis e resistentes ao impacto comparadas com as resinas termorrígidas (MANO; MENDES, 1999; STRONG, 2008).

Os compósitos termoplásticos são produzidos a partir de matrizes como polipropileno (PP), polietileno (PE) ou poliamida (PA), e reforçados com diversos tipos de fibras. O crescente desenvolvimento de materiais e tecnologias para produção de compósitos termoplásticos possibilitou a produção de materiais leves, com custo reduzido e com excelentes resistências mecânicas (GOWAYED, 2013). A Tabela 5 apresenta as propriedades físicas e mecânicas dos termoplásticos mais importantes na produção de compósitos.

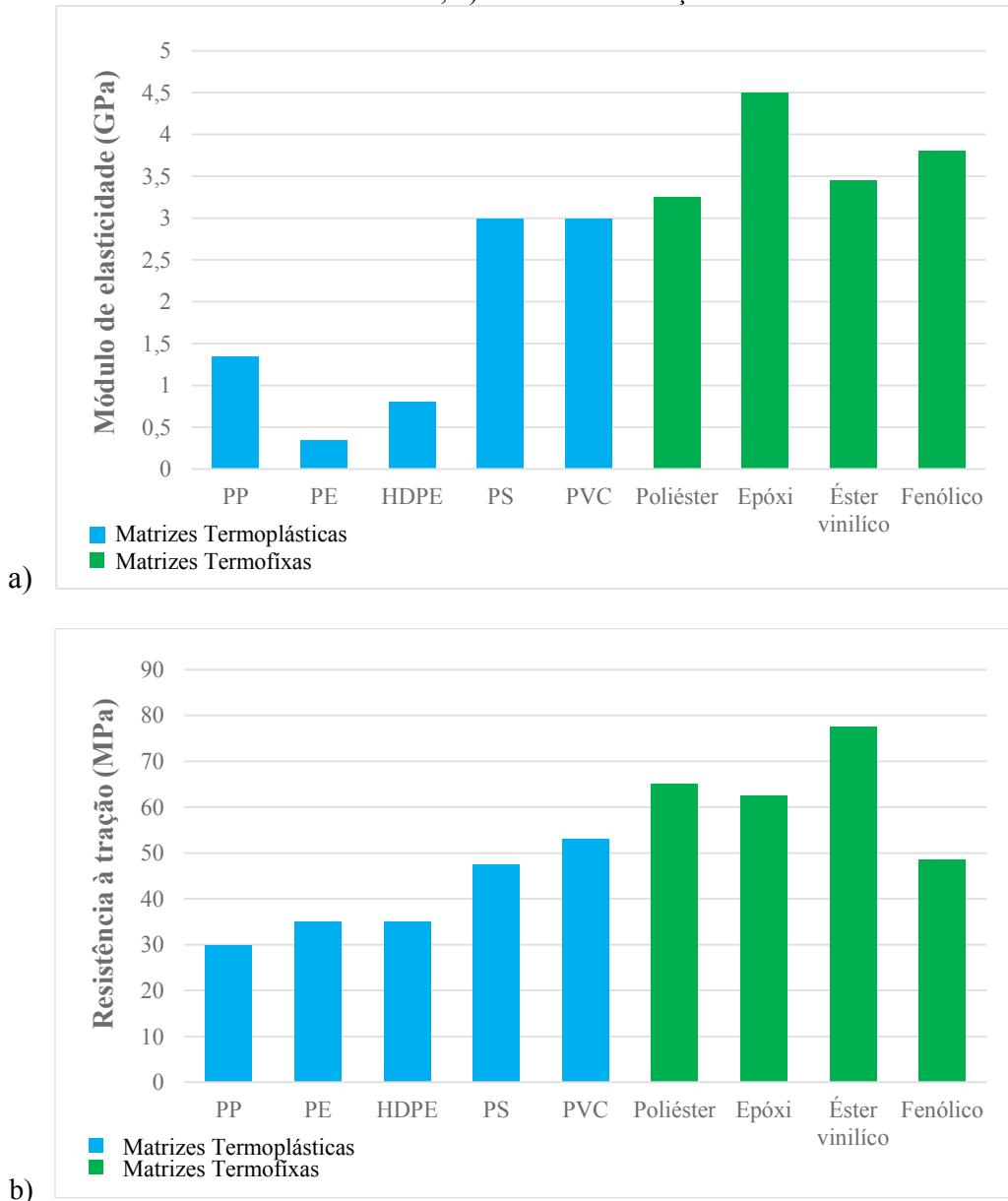
Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas de resinas termoplásticas.

Matrizes termoplásticas					
Propriedades	PP	PE	HDPE	PS	PVC
Densidade (g/cm ³)	0,90-0,91	0,91-0,95	0,94-0,97	1,04-1,05	1,38
Módulo de elasticidade (GPa)	1,1-1,6	0,3-0,5	0,5-1,1	2,5-3,5	3
Resistência à tração (MPa)	20-40	25-45	30-40	35-60	53
Temperatura de fusão (°C)	175	115	137	240	212

Fonte: PEREIRA *et. at.* (2015).

A partir da Tabela 4 e Tabela 5 foram feitos gráficos para comparar as propriedades das resinas termofixas e termoplásticas, entre elas destaca-se a resina epóxi, apresentando maior módulo de elasticidade e possuindo resistência à tração entre as melhores, como ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Propriedades mecânicas das resinas termoplásticas e termofixas: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração.



Fonte: PEREIRA *et al.* (2015).

Carvalho (2005) realizou uma pesquisa produzindo compósitos poliméricos reforçados com tecidos de sisal para reforço de estruturas de madeira, avaliando dois tipos de matrizes nos compósitos, a resina epóxi e poliuretana derivada do óleo de mamona. O autor observou que

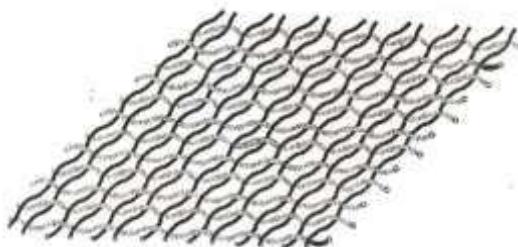
entre as resinas avaliadas, a resina epóxi é a mais adequada para aplicações de compósitos estruturais.

2.2.3 TECIDOS

Os tecidos unidirecionais utilizados em compósitos, são arranjos de fios em uma única direção, podendo conter fios transversais apenas para manter os fios longitudinais unidos. Os tecidos são formados por um conjunto de fios entrelaçados a ângulos retos em uma sequência determinada, sendo compostos por duas direções, trama e urdume (urdidura), geralmente são produzidos em teares. O urdume é indicado pela direção do comprimento do tecido e a trama refere-se à direção transversal ao urdume. Normalmente esses tecidos possuem larguras entre 60 cm e 150 cm, já larguras de 2 cm a 40 cm são conhecidos como fitas (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

A produção do tecido plano é a mais simples com função de reforço estrutural, sendo caracterizado pelo entrelaçamento da trama nos fios de urdume, onde os fios da trama se entrelaçam acima e abaixo dos fios do urdume, repetindo de forma inversa para a segunda coluna e assim sucessivamente, podendo ter uma melhor compreensão na Figura 26 (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Figura 26 – Esquema de tecido plano.

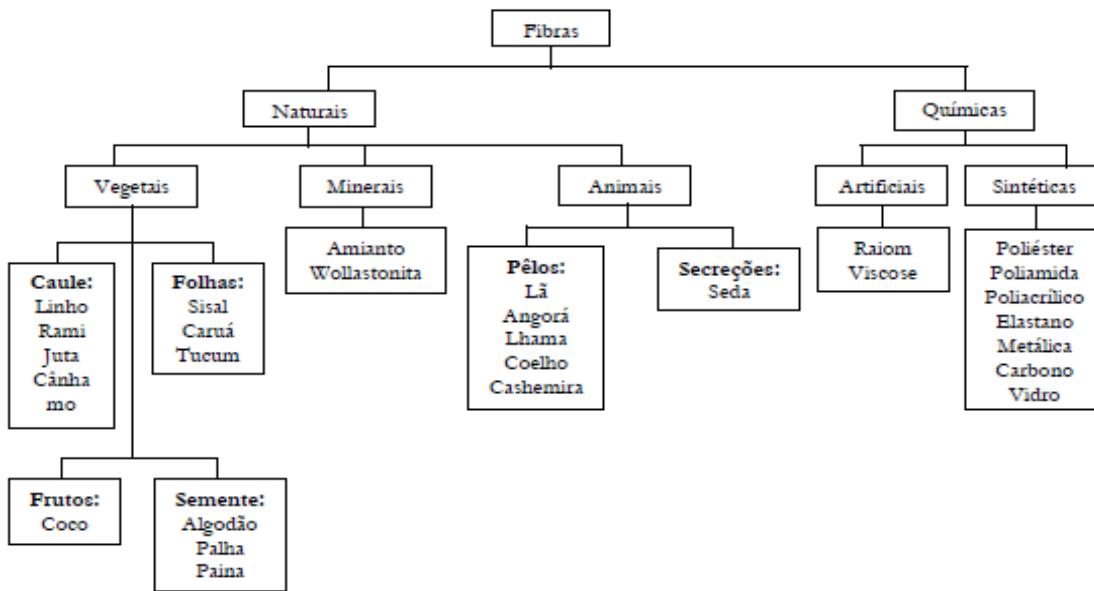


LEVY NETO E PARDINI (2006).

2.2.4 FIBRAS

As fibras são conhecidas por possuírem diâmetro variando entre 1 μm e 25 μm e são obtidas a partir de materiais naturais ou processados. No mercado existem diversos tipos de fibras que podem ser usados como reforço em compósitos de matriz cimentícia ou polimérica, como é o caso das fibras de vidro, aço, carbono, aramida, entre outros. Estas fibras apresentam elevado módulo de elasticidade e boa resistência à tração (MILANESE, 2008; BENTUR; MINDESS, 2007). As fibras são classificadas como naturais e químicas, como apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Classificação das fibras.



Fonte: MILANESE (2008).

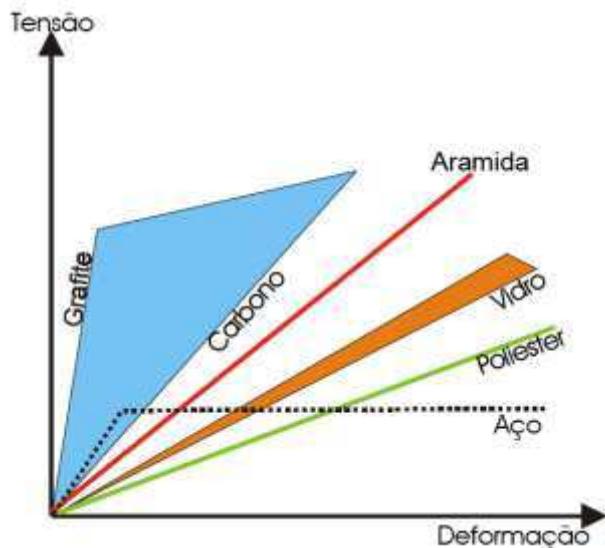
A combinação de polímeros e materiais fibrosos torna possível a produção de materiais de propriedades excelentes. Como salientado anteriormente, a resistência e o módulo em um polímero reforçado com fibras são dependentes das propriedades mecânicas de cada fibra, da matriz, fração volumétrica, comprimento e orientação das fibras. O reforço da matriz ocorre, por definição, quando o material de PRF exibe aumento da resistência ou módulo em relação à resistência e módulo da matriz isolada (MASUELLI, 2013).

Atualmente, vários tipos de fibras e com grande variedade de propriedades estão comercialmente disponíveis. As fibras longas (contínuas) e de pequeno diâmetro são consideradas as mais adequadas para o reforço de estruturas de concreto, pela ótima capacidade de transferência de carga e de aproveitamento de suas propriedades. As propriedades físicas e mecânicas variam consideravelmente entre os diferentes tipos de fibra, podendo variar para o mesmo tipo de fibra (ARAÚJO, 2002). As fibras curtas são usualmente definidas como tendo um comprimento inferior a 100 vezes o diâmetro equivalente (CARVALHO, 2005).

A Figura 28 apresenta o comportamento à tração desses materiais fibrosos, sendo caracterizado por uma relação (tensão/deformação) elástica linear até a ruptura, que é súbita e frágil. Essas fibras sintéticas apresentam comportamento diferente que a do aço, que é caracterizado por um comportamento dúctil, e sua fragilidade pode influenciar e limitar o comportamento dúctil dos elementos de concreto reforçados. No entanto, estes materiais podem aumentar significativamente a resistência e ductilidade quando usados para

confinamentos de pilares. O comportamento frágil dos compósitos pode ser explicado em função da sua restrita distribuição de tensões, devido à falta de ductilidade (MACHADO, 2015; TENG *et al.*, 2002).

Figura 28 – Gráfico de tensão x deformação de materiais fibrosos e aço.



Fonte: SANTOS (2003).

Observa-se ainda que as fibras de carbono apresentam maior resistência e rigidez, comparadas com as demais fibras utilizadas para o reforço de polímeros. Ripper e Scherer (1999) destacam principalmente a rigidez e leveza, ótimo comportamento relativo à fadiga, estabilidade térmica e reológica e resistência aos vários tipos de ataques químicos. Porém, as fibras de carbono podem provocar corrosão do tipo galvânico quando em contato com os metais, isso devido a sua boa condutividade elétrica (RIPPER, 1998).

Segundo Hollaway (2003), fibras com aplicações em compósitos poliméricos devem atender aos seguintes requisitos:

- A fibra deve ter um módulo de elasticidade elevado para uma utilização eficiente como reforço;
- A fibra deve apresentar uma elevada resistência à tração;
- A variação da força entre as fibras individuais deve ser baixa;
- As fibras devem ser estáveis e manter sua resistência durante o manuseio e fabricação;
- O diâmetro e superfície das fibras devem ser uniformes;

O diâmetro equivalente das fibras variam segundo o material e o processo de obtenção. As fibras sintéticas e metálicas apresentam diâmetros equivalentes uniformes enquanto as vegetais apresentam seções transversais variáveis, pois são formadas por processos naturais de pouca homogeneidade, o que torna o diâmetro equivalente a um parâmetro difícil de ser quantificado (CARVALHO, 2005).

2.2.5 FIBRAS SINTÉTICAS

Atualmente, as fibras de vidro, aramida e carbono são as mais utilizadas nos compósitos empregados para reforço de estruturas na construção civil, sendo destacados neste subcapítulo as fibras de vidro e carbono. O emprego desses materiais em uma estrutura depende principalmente do módulo de elasticidade, da resistência, da rigidez e da resistência à corrosão requerida, além do orçamento permitido (HOLLOWAY; HEAD, 2001 apud SANTOS, 2003).

Grande parte da pesquisa sobre a utilização de fibras de vidro como reforço no concreto surgiu na década de 60. O uso da fibra de vidro na construção civil se tornou frequente devido o balanço econômico entre seu custo e resistência específica. O material conhecido como E-Glass é responsável por 80% a 90% da produção comercial das fibras de vidro. Este material é produzido a partir de uma família de vidros obtidos de silicatos de cálcio e alumina, podendo ser moldados de inúmeras formas e com aplicações virtualmente ilimitadas (MACHADO, 2002).

Segundo Pereira (2009), as fibras de vidro se estabelecem pela união de óxido de silício e diversos outros óxidos, como alcalinos, alumina e alcalinotérreos, sendo mais utilizadas aquelas à base de silício e que possuem no mínimo dois silicatos, sendo eles, alcalinos (silicato de sódio) e alcalinotérreo (silicato de cálcio). Essas fibras apresentam como benefício o baixo coeficiente de dilatação térmica, facilidade de processamento, grande inércia química e boas propriedades mecânicas, o que a torna uma das mais utilizadas em compósitos com matriz poliméricas; porém, possuem algumas desvantagens, como baixa resistência à fadiga e auto-abrasividade (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

As fibras de vidro apresentam propriedades isotrópicas e podem ser produzidas nas formas de filamentos contínuos e fibras picadas (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Essas fibras são classificadas em duas categorias, a primeira com resistência à tração na faixa de 1000-2000 MPa e módulo em torno de 70 GPa (tipo E, A, C, E-CR) e outra categoria, onde a resistência

à tração está na faixa de 2000-3000 MPa e módulo em torno de 85 GPa (tipo R, S e AR). A seguir, os principais tipos de fibra de vidro utilizadas na construção civil citadas por Pereira, 2009 e Santos, 2003:

- ✓ Fibras do tipo A: possui elevada resistência química (alcalino), baixo módulo e baixa resistência elétrica.
- ✓ Fibras do tipo C: excelente resistência a corrosão química, baixa resistência mecânica, sendo mais dispendiosa quando comparada às fibras do tipo E.
- ✓ Fibras do tipo D: possui excelentes propriedades dielétricas, usado em construções de materiais elétricos.
- ✓ Fibras do tipo E: tipo mais utilizado entre os materiais compósitos, por ser mais barato e possuir boas propriedades elétricas, rigidez e desgaste.
- ✓ Fibras do tipo R e S: elevadas características mecânicas, resistência à fadiga, temperatura e umidade e apresentam maior resistência a corrosão do que as do tipo E.
- ✓ Fibras do tipo AR: é usada como reforço nos compósitos do tipo “cimento reforçado com fibra”, por apresentar resistência a ácidos.

As fibras de vidro foram as primeiras aplicações de PRF em concreto, por apresentarem menor custo e propriedades mecânicas aceitáveis. Entretanto, foi verificado ao longo dos anos, que suas propriedades se degradavam. Este fato, junto com a diminuição do custo da fibra de carbono, fez com que se tornasse viável a utilização de PRFC (RECUREDO e DIEGO, 2001 apud SANTOS, 2003).

Segundo Taylor (1994), a fibra de carbono é um material altamente promissor, baseado na força das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono. As propriedades mecânicas das fibras de carbono são diretamente dependentes de sua estrutura molecular e seus defeitos. Sua produção é através de um processo de carbonatação, a temperaturas acima de 1000°C, adicionando-se átomos de carbono ao longo de fibras de polímeros orgânicos. Existem dois tipos de fibras de carbono: as do tipo I, apresentando alto módulo de elasticidade, e as do tipo II, obtendo elevada resistência a tração, sendo que, a diferença entre as suas propriedades está relacionada com a microestrutura da fibra. As fibras de carbono

com maior módulo de elasticidade são obtidas através do tratamento térmico em temperaturas situadas entre 1000°C e 3000°C (MACHADO, 2005; SANTOS, 2003).

Callister (1997) afirma que as fibras de carbono em relação aos outros materiais apresentam elevada resistência a tração, resistência à fadiga, rigidez e características de amortecimento às vibrações, proporcionando uma estabilidade dimensional a estrutura ao possuírem elevada rigidez, tornando as deformações menores e preservando as dimensões da peça. A Tabela 6 apresenta os valores médios típicos das propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras sintéticas usadas em materiais compósitos.

Tabela 6 – Propriedades físicas e mecânicas dos principais tipos de fibras sintéticas.

Propriedades	Vidro E	Vidro S	Carbono HS (alta resistência)	Carbono HM (alto módulo)	Aramida	Aço
Módulo de Elasticidade (GPa)	72	86	295	725	131	205
Coeficiente de Poisson	0,2	0,22	0,2	0,2	0,35	0,3
Resistência à tração (MPa)	3450	4500	5500	2400	3600	500
Deformação de ruptura na tração (%)	4	5	1,2	0,5	2,5	15
Densidade (kg/m ³)	2540	2490	1750	1950	1450	7800

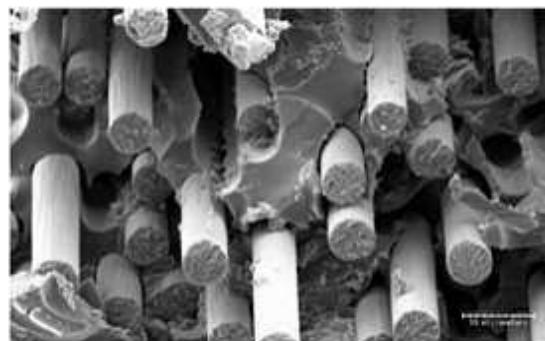
Fonte: CHAVES (2010).

Pode-se observar que as fibras de carbono apresentam maior módulo de elasticidade e resistência a tração, quando comparada as demais fibras, principalmente com relação ao aço, superando suas propriedades mecânicas, perdendo apenas para as fibras de aramida, em relação a sua densidade.

A partir dessas fibras são obtidos os respectivos compósitos estruturados denominados por: polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), polímeros reforçados com fibras de aramida (PRFA) e polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC). Segundo Santos (2003), estes PRF podem ser encontrados no mercado na forma de barras arredondadas, painéis para fachada, perfis, laminados pré-fabricados ou preparado *in situ* com mantas ou tecidos e cabos de proteção, principalmente com fibras de carbono e aço.

A Figura 29 apresenta uma micrografia, obtida em microscópico eletrônico, de um sistema compósito de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono. Pode-se observar que as fibras de carbono do tecido estão completamente impregnadas pelas resinas da matriz polimérica.

Figura 29 – Ampliação eletrônica de um composto estruturado com fibras de carbono.



Fonte: MACHADO (2002).

2.2.6 FIBRAS NATURAIS

No século passado, foi dada prioridade para as fibras sintéticas fabricadas com utilização intensiva de energia. Atualmente, com a atual preocupação dos efeitos causados pela queima de combustíveis fósseis, foram impulsionadas pesquisas que viabilizassem a substituição destes processos por outros de menor impacto. A utilização de materiais naturais permite poupar energia e reduzir o impacto ambiental, e além disso são materiais renováveis e biodegradáveis (MONTEIRO *et al.*, 2009).

As fibras naturais podem ser subdivididas em animais, minerais e vegetais. As fibras minerais são formadas por cadeias cristalinas com grande comprimento. As fibras de origem animal apresentam cadeias protéicas, enquanto as fibras vegetais apresentam natureza celulósica. Por apresentarem conteúdo majoritário de lignina e celulose, essas fibras são conhecidas como lignocelulósicas, dentre elas destacam-se as fibras de sisal, rami, bambu e coco. Além da abundância e disponibilidade, essas fibras apresentam vantagens, devido ao reduzido consumo de energia envolvido em sua produção, quando comparado ao necessário para a fabricação das fibras sintéticas (GIACOMIN, 2003; BARBOSA, 2011; IZQUIERDO, 2011).

De acordo com a elasticidade das fibras, elas são divididas em baixo e alto módulo. As fibras de baixo módulo melhoram a resistência ao impacto e permitem ao compósito trabalhar no estágio pós fissurado, controlando a abertura e propagação das fissuras, aumentando assim consideravelmente sua tenacidade, quando aplicado teores adequados, fazendo com que a matriz não venha a se romper subitamente, tendo uma deformação plástica considerável antes do rompimento, enquanto as fibras de alto módulo melhoram a resistência do compósito, principalmente à tração (CAETANO *et al.*, 2004; BARBOSA, 2011).

Questões sociais e ambientais são hoje as vantagens mais significativas para substituição de fibras sintéticas por fibras naturais. Além de resolver parte dos problemas ambientais, a produção de fibras naturais desenvolve a economia de regiões isoladas, representando uma importante fonte de renda para as populações locais (MONTEIRO *et al.*, 2009).

O uso de fibras lignocelulósicas como reforço para materiais poliméricos, como substituto de fibras sintéticas vem crescendo nos últimos anos, principalmente nos setores industriais, tais como embalagens e automóveis, e na construção civil na forma de compósitos (WAMBUA *et al.*, 2003). No entanto, algumas fibras lignocelulósicas disponíveis apresentam incompatibilidade com algumas matrizes poliméricas. O maior problema é a adesão da fibra à matriz polimérica. Uma fraca aderência na interface significa que a capacidade otimizada do compósito não pode ser atingida. Pouca aderência entre polímeros hidrofóbicos e fibras hidrofílicas resultam em baixo desempenho mecânico. No entanto, estas propriedades podem ser melhoradas através de tratamentos físicos e químicos (SATYANARAYANA *et al.*; 2005; BARBOSA, 2011).

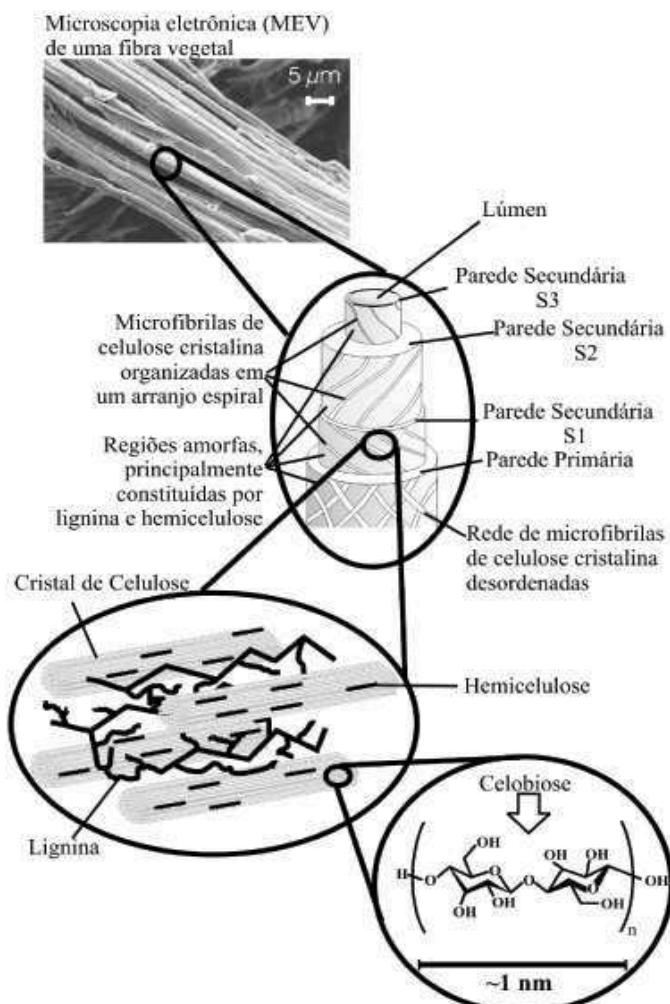
Apesar das inúmeras vantagens do uso de fibras vegetais como reforço de matrizes poliméricas, elas possuem algumas limitações, que requerem cuidados especiais para um melhor desempenho na produção dos compósitos. Dentre essas estão: elevada absorção de umidade, a qual prejudica a aderência à matriz, variabilidade de propriedades entre as fibras de mesmo tipo e suscetibilidade a ataques biológicos.

As fibras vegetais são consideradas como compósitos de fibrilas de celulose, mantidas coesas por uma matriz constituída de lignina e hemicelulose. Além destes componentes, são encontrados pectina, compostos inorgânicos, moléculas extraíveis com solventes orgânicos e outros componentes em baixas concentrações. Cada fibra-celular individual tem estrutura complexa formada por paredes celulares que circundam o lúmen. As paredes são constituídas de camadas formadas por feixes de microfibrilas que crescem no vegetal em forma de espiral, com diferentes orientações angulares (SILVA *et al.*, 2009; BLEDZKI E GASSAN, 1999; BARBOSA, 2011).

Cada fibra lignocelulósica tem uma estrutura de camadas complexas; constituída por uma parede primária fina, inicialmente depositada durante o crescimento das células, que circunda uma parede secundária. A parede secundária é constituída por três camadas (S1, S2 e S3), onde a camada intermediária (S2) determina as propriedades mecânicas da fibra e

consiste em uma série de microfibrilas, helicoidalmente formadas por longas cadeias de celulose e organizadas no sentido da fibra. Tais microfibrilas têm o diâmetro de 10 a 30 nm e são resultantes do empacotamento de 30 a 100 cadeias de celulose estendidas (SILVA *et al.*, 2009; NAVARO, 2011; BARUD, 2010). A organização mais comum de uma fibra vegetal e seus respectivos componentes estão representados na Figura 30.

Figura 30 – Estrutura de uma fibra vegetal, a imagem em MEV se refere a uma fibra de eucalipto.

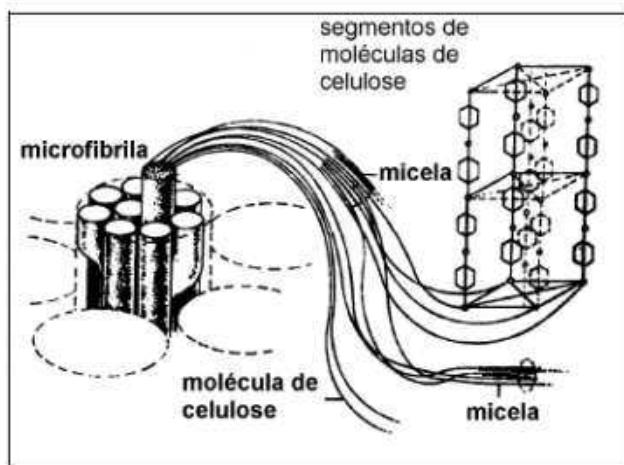


Fonte: SILVA *et al.* (2009).

O principal componente das microfibrilas é a celulose. Essas microfibrilas estão interligadas por uma rede de moléculas de hemicelulose, polissacarídeos de cadeia ramificada, caracterizados pela estrutura irregular e ausência de cristalinidade. A celulose possui uma estrutura microcristalina com regiões altamente ordenadas (regiões cristalinas), e regiões desordenadas (regiões não cristalinas). Esta cristalinidade vem do estabelecimento de ligações de hidrogênio entre as cadeias, embora ligações de hidrogênio também ocorram na

fase não cristalina, porém com baixo nível de organização (NAVARRO, 2011; BLEDZKI; GASSAN, 1999). Outro importante constituinte das paredes é a lignina, um polímero hidrofóbico derivado de unidades fenilpropanóides, denominadas C₆C₃, repetidas de forma irregular. As ligações éteres dominam a união entre suas unidades, formando uma resina amorfa que atua como um cimento entre as fibrilas e no interior das fibras. As microfibrilas são compostas por micelas, formadas por cristais de moléculas de celulose na ordem de angstroms, ordenadas paralelamente em diferentes estruturas alotrópicas (BARBOSA, 2011; SILVA *et al.* 2009; NAVARRO, 2011). A Figura 31 esquematiza um feixe de microfibrilas com seus respectivos componentes.

Figura 31 – Estrutura das microfibrilas, contendo micelas e moléculas de celulose ordenadas.



Fonte: BLEDZKI E GASSAN (1999).

As diferenças entre os vários tipos de fibras incluem o número de células fibrilares, espessura das paredes celulares, tamanho e arranjo das células. Com isso, cada fibra apresenta diferentes características e comportamento mecânico (FIDELIS, 2013). O aumento da resistência das fibras está relacionado com o aumento do teor de celulose e diminuição do ângulo espiral, em relação ao eixo da fibra. A orientação das microfibras é diferente para os diversos tipos de fibras lignocelulósicas. O ângulo microfibrilar para o rami é 7,5° e para o sisal 20°. Além dos parâmetros citados anteriormente, a resistência e rigidez da fibra são também influenciados pela cristalinidade e grau de polimerização. Devido à orientação axial imperfeita dos agregados fibrilares, vazios interfibrilares e intrafibrilares e a falta de ordenação em regiões entre os cristalitos no interior das fibrilas primárias, o sistema de poros das fibras de celulose é formado (SMOLE *et al.*, 2005).

A composição química das fibras vegetais comumente usadas como reforço de compósitos poliméricos, pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química das fibras naturais.

Nome das fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Pectina (%)
Bambu	26-43	15-26	21-31	-
Banana	60-65	6-19	5-10	3-5
Algodão	82-96	2-6	0.5-1	5-7
Linho	60-81	14-19	2-3	0.9
Câñhamo	70-92	18-22	3-5	0.9
Juta	51-84	12-20	5-13	0.2
Rami	68-76	13-15	0.6-1	1.9-2
Sisal	43-78	10-13	4-12	0.8-2

Fonte: Adaptado de MWAIKAMBO (2006).

A análise de fraturas das fibras naturais pode ser entendida em termos de parâmetros estruturais (quantidade de celulose, ângulo helicoidal ou dimensões das células). Através de observações de microscopias de rupturas das fibras, é possível classificar os modos de fratura em dois grupos: (a) intercelular e (b) intracelular. A propagação de trinca observada entre as células é classificada como fratura intercelular, devido a fraca ligação entre elas. Este tipo de fratura ocorre em fibras onde o alongamento na ruptura é menor que 4%, apresentando elevada resistência mecânica. Já a propagação de trincas através das células é caracterizada pela fratura intracelular. Essas fibras apresentam grande alongamento na ruptura, maior que 4%, e apresentam menor resistência mecânica (TOMCZAK, 2010). A Tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas de algumas fibras naturais.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas das fibras naturais.

Nome das fibras	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento de Ruptura (%)	Densidade (g/cm ³)
Bambu	575	27	-	-
Banana	529 - 914	27,0 - 32,0	1,0 - 3,0	-
Algodão	287 - 597	5,50 - 12,60	7,0 - 8,0	1,5 - 1,6
Linho	500 - 900	27,60 - 70,0	1,3 - 3,3	1,5
Câñhamo	310 - 750	30,0 - 60,0	2,0 - 4,0	-
Juta	200 - 450	20,0 - 55,0	2,0 - 3,0	1,5
Rami	400 - 938	23,0 - 128,0	1,80 - 5,30	1,51
Sisal	511 - 840	9,0 - 22,0	2,0-14,0	1,27 - 1,5

Fonte: Adaptado de MWAIKAMBO (2006); SOARES (2012); LEVY NETO E PARDINI (2006).

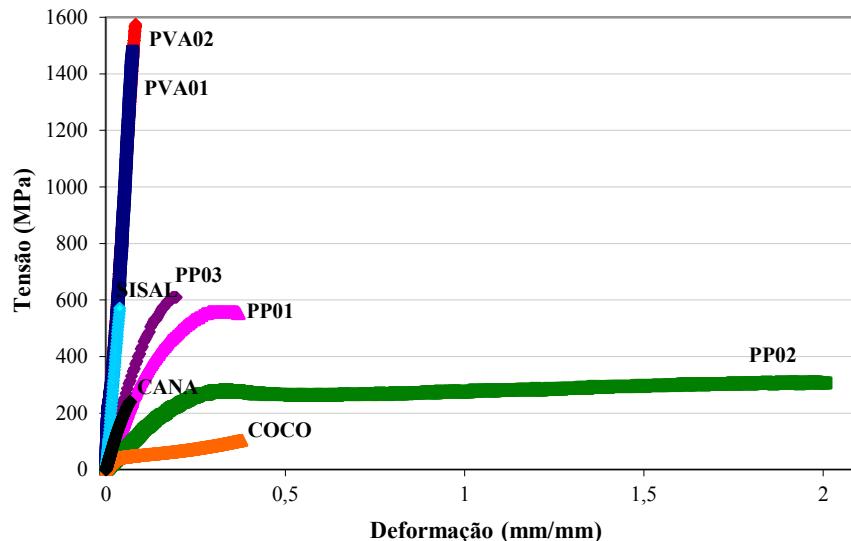
Na Tabela 8 pode-se observar que a fibra de rami apresenta maiores propriedades mecânicas em relação as demais fibras vegetais. As propriedades das fibras de rami e do linho podem atingir níveis próximos dos valores das fibras de vidro tipo E. Portanto, é possível utilizar

fibras vegetais para reforçar polímeros com resina epóxi, devido suas boas propriedades mecânicas como resistência, rigidez e baixa densidade.

A grande variação nas propriedades de cada fibra vegetal pode ser explicada pelas condições ambientais de produção, idade da planta, tipo de solo, condições climáticas do local, e principalmente, à estrutura e composição química (MWAIKAMBO, 2006; CARVALHO e CAVALCANTI, 2006).

Motta (2007) caracterizou fibras naturais e sintéticas, com comprimento de 6 e 30 mm, para fins de reforço em compósitos aplicados na construção civil, sendo de suma importância conhecer as propriedades mecânicas e geométricas das fibras para a função de reforço em compósitos. As fibras sintéticas foram obtidas de origem diversas e submetidas a tração direta, com o intuito de avaliar as mudanças das propriedades mais influentes no comportamento final dos compósitos. As fibras de estudo neste trabalho foram sisal, coco, cana, polipropileno (PP) e PVA. Após os ensaios foram observadas que as fibras obtiveram comportamentos distintos, como ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Diagrama tensão deformação das fibras de estudo.



Fonte: MOTTA (2007).

Pode-se observar ainda que as fibras de sisal e PVA apresentaram propriedades mecânicas superiores, enquanto as fibras de cana, coco, e polipropileno apresentaram rigidez muito próximas. Dentre as fibras vegetais, as de coco apresentaram propriedades mecânicas inferiores, tendo uma grande deformação antes da ruptura com elevação da resistência em todo o trecho final. As fibras de sisal apresentaram propriedades superiores dentre as demais fibras vegetais, apresentando comportamento de polímeros semicristalinos frágeis, com

pequena deformação na ruptura das fibras de sisal. As fibras de cana apresentaram desempenho intermediário entre as fibras estudadas e pequena deformação na ruptura. Comparando as fibras vegetais com as de polipropileno, pode-se observar que as fibras de polipropileno apresentaram módulo de elasticidade inferiores às de sisal, e deformações na ruptura variável entre as diferentes fibras de polipropileno. As fibras de PVA apresentam maior módulo entre essas fibras, tendo ruptura frágil. Por fim, os resultados apresentados neste trabalho mostraram a importância da caracterização das fibras para a produção de compósitos com propriedades mecânicas desejáveis, pois a utilização de fibras de origens diversas na produção de compósitos podem trazer propriedades distintas, em função das propriedades das fibras de reforço.

2.2.7 FIBRAS DE SISAL

A fibra de sisal é obtida a partir da *Agave sisalana*, nativa do México. Trata-se de uma planta resistente, que cresce bem em uma variedade de climas quentes, incluindo áreas secas impróprias para outras culturas. Tais fibras são obtidas das folhas da planta, onde após a colheita, as folhas são cortadas, esmagada entre cilindros e depois raspada mecanicamente, afim de separar a polpa das fibras. O comprimento da fibra de sisal varia entre 0,6 e 1,5 m e os seus diâmetros variam de 100 a 300 μm . As fibras de sisal são brilhantes e possuem uma coloração creme claro ou amarelada pardacenta, pertence à classe de monocotiledôneas e o principal produto é a fibra grossa e dura, que apresenta elevados teores de celulose e lignina, tornando as fibras resistentes e duráveis, porém inadequado para têxteis ou tecidos. O sisal é usado em cordéis e cordas, e também muito usado como reforço em materiais compósitos plásticos (FAO, 2009; SOUSA, 2013; MOHANTY *et al.*, 2005).

As propriedades de tração de fibras de sisal não são uniformes ao longo do seu comprimento. Fibras extraídas a partir da raiz ou partes inferiores da folha podem ter uma resistência à tração e módulo inferior. As fibras tornam-se mais fortes e mais rígidas no meio, e as fibras extraídas a partir da ponta têm propriedades moderadas (SMOLE *et al.*, 2005).

O sisal é cultivado para produção de fibras no Brasil, China, Cuba, Quênia, Haiti, Madagascar e México (FAO, 2009). O Brasil cultiva estas fibras nos sertões do Nordeste em regiões semi-áridas, pela facilidade em adaptar a regiões secas (MILANESE, 2008). Os principais produtores são Bahia, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Pernambuco. Segundo IBGE (2012), a produção de sisal em 2011 foi de 287 mil toneladas, sendo a Bahia

responsável pela produção de 96,85% deste total. A Figura 33 ilustra uma plantação de sisal para produção de fibras.

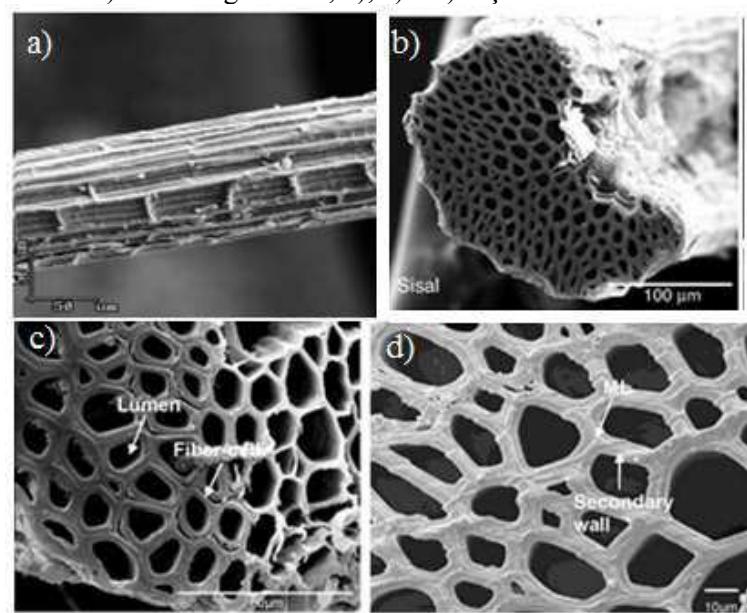
Figura 33 – Plantação de fibras de sisal.



Fonte: SILVA (2006).

As fibras naturais apresentam morfologia semelhante, mas diferem por alguns fatores como a área interna dos lúmens, o número de lúmens, o número e tamanho das fibras celulares e área transversal. Com isso, cada fibra possui sua morfologia característica (FIDELIS, 2013). A fibra é composta por numerosas células fibras que estão ligadas entre si por meio de lamelas, que consistem em hemicelulose, lignina e pectina. Uma fibra de sisal em secção transversal é constituída por cerca de 120 células de fibra (SMOLE *et al.*, 2005). A Figura 34 apresenta as imagens da fibra de sisal obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 34 – Micrografias de uma fibra de sisal obtidas por microscopia eletrônica de varredura.
a) vista longitudinal, b), c) e d) seção transversal.



Fonte: TOLEDO (1997); FIDELIS (2013).

Estudos realizados por Fidelis (2013) indicam que a diminuição da área do lúmen e da largura da parede celular secundária estão associadas a um aumento na resistência a tração e do Módulo de Young. A fibra de sisal apresenta um elevado número de fibras celulares e

um alto teor de celulose, estes fatores contribuem para suas propriedades superiores. Atualmente, muitos estudos sobre o efeito da composição química e morfologia das fibras sob suas propriedades mecânicas estão sendo desenvolvidos, o objetivo é otimizar parâmetros no cultivo e processamento para se obter a fibra com propriedades mecânicas otimizadas.

2.2.8 FIBRAS DE RAMI

Native da Ásia Oriental e comumente conhecido como grama da China, o rami (*Boehmeria nivea*) é uma planta da família da *urticaceae*. Sua casca tem sido usada há milênios para fazer fios e linhas, muito utilizada na confecção de roupas na china. A planta cresce até uma altura de 3,0 m, apresentando folhas em forma de coração e brancas na sua face inferior, devido à presença de pelos longos, muito finos e entrelaçados. As produções de plantas verdes variam de 8 a 20 toneladas por hectares, com rendimentos de fibras de 1,5 toneladas. As fibras de rami são extraídas do caule da planta após a descorticagem do mesmo, logo após seu corte (FAO, 2009; BENATTI JR., 1988).

A fibra de rami é uma das fibras naturais mais fortes, com módulo de elasticidade e resistências superiores as demais fibras naturais. Os maiores produtores de rami para produção de fibras são a China, Brasil, Laos e Filipinas. Estima-se que a produção mundial de rami, planta verde, foi de 280 000 toneladas em 2005, quase toda fração cresceu na China. Os principais importadores são o Japão, Alemanha, França e Reino Unido (FAO, 2009; BENATTI JR., 1988). A Figura 35 apresenta a planta de rami.

Figura 35 – Aspectos das folhas, caule e flores do rami.



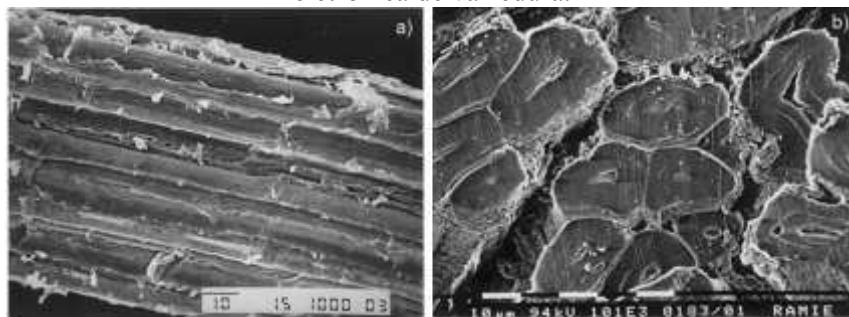
Fonte: FREIRE *et al.* (1996).

Células de fibras individuais estão unidas em feixes de fibras por lignina, hemicelulose e pectinas, componentes difíceis de remover neste tipo de fibra. O comprimento final da fibra é entre 120-150 mm e o diâmetro das fibras é de 40-60 μm . A eficiência do processo de maceração normalmente utilizado não é suficiente para extrair fibras de rami de hastes. A

combinação de tratamento microbiano e químico é conhecido por ser muito eficaz e econômico. As fibras de rami apresentam resistência a ataques de bactérias e insetos, tendo como principal desvantagem a sua baixa elasticidade (alongamento de ruptura é de 3-7%), o que significa que é duro e quebradiço (MATHER *et al.*, 2011; SMOLE *et al.*, 2005).

As células fibrilares de rami apresentam-se nas formas cilíndrica e oval. A superfície das fibras é rugosa e caracterizada por pequenas saliências, estriamento e fissuras profundas. Fibra de rami pode ser facilmente identificada pela sua rugosidade, espessura da parede celular, baixa torção e características de superfície (ANGELINI *et al.* 2000). A Figura 36 ilustra a vista longitudinal e a seção transversal das fibras de rami.

Figura 36 – a) vista longitudinal e b) seção transversal de fibras de rami obtidos por microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: ANGELINI *et al.* (2000).

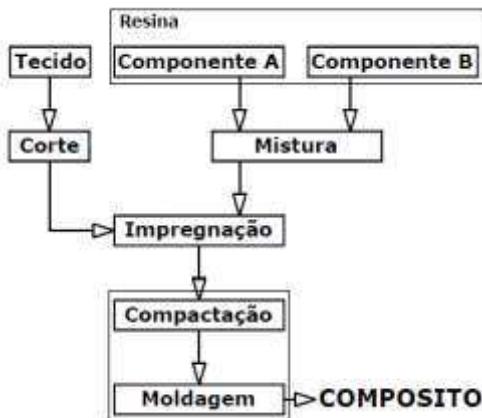
Como a parede celular primária é frequentemente lignificada, este aspecto é responsável pela baixa higroscopicidade das fibras de rami. Estas fibras apresentam pequenas irregularidades e deformações. A ampla faixa de resistência à tração das fibras está geralmente associada a falhas e defeitos, que podem ocorrer naturalmente ou ser introduzidos durante o manuseio, além da possibilidade de envelhecimento da superfície. É amplamente aceito que esses defeitos são as principais causas de falha prematura da fibra sob carga de tração (CURTIN, 1994).

2.2.9 CONFORMAÇÃO DE COMPÓSITOS LAMINADOS

Conforme Carvalho (2005), a conformação dos compósitos é compreendida pela aplicação de materiais em fôrmas, sob temperatura e pressão controlados, afim de promover a cura da resina e compactação dos materiais nas condições adequadas. As características dos materiais e o método de produção influenciam no comportamento e propriedades finais dos materiais compósitos, e entre elas estão a viscosidade da resina, o método de aplicação da resina, o arranjo e teor de fibras, aplicação à vácuo e pressão, ciclo de temperatura (acelerar

ou retardar a polimerização), dentre outros. A Figura 37 apresenta o esquema de conformação dos materiais compósitos, utilizando tecidos como reforço em matriz poliméricas.

Figura 37 – Esquema de processamento de tecidos e resinas para obtenção de compósitos.



Fonte: CARVALHO (2005).

Existem vários processos de conformação de compósitos laminados, tais processos podem ser combinados em diferentes estratégias. Segundo Blass (1985), os processos são realizados em moldes fechados e abertos, em câmara de pressão e a vácuo, por pistola, por centrifugação, por injeção, por matrizes combinadas, por laminação contínua, moldagem manual e enrolamento de filamentos.

Na fabricação manual de compósitos laminados, os tecidos são inseridos em moldes, em camadas alternadas de resina e tecido para melhor impregnação da resina nas fibras, e em cada camada deve ser feita a compactação com roletes e pincéis para eliminar más acomodações das fibras, bolhas de ar e excesso de resina. Para a produção de compósitos, existe uma série de variáveis que devem ser consideradas para a obtenção de um material que atenda às necessidades da aplicação, incluindo características da resina, o tempo de moldagem, viscosidade e a liberação de gases. As características que mais interferem no processo de conformação são o teor, comprimento e seção transversal das fibras, as condições de processamento como pressão, umidade, temperatura, além dos detalhes de fôrmas. Para uma boa eficiência mecânica dos compósitos produzidos é indicado que os materiais constituintes apresentem continuidade e homogeneidade (CARVALHO, 2005).

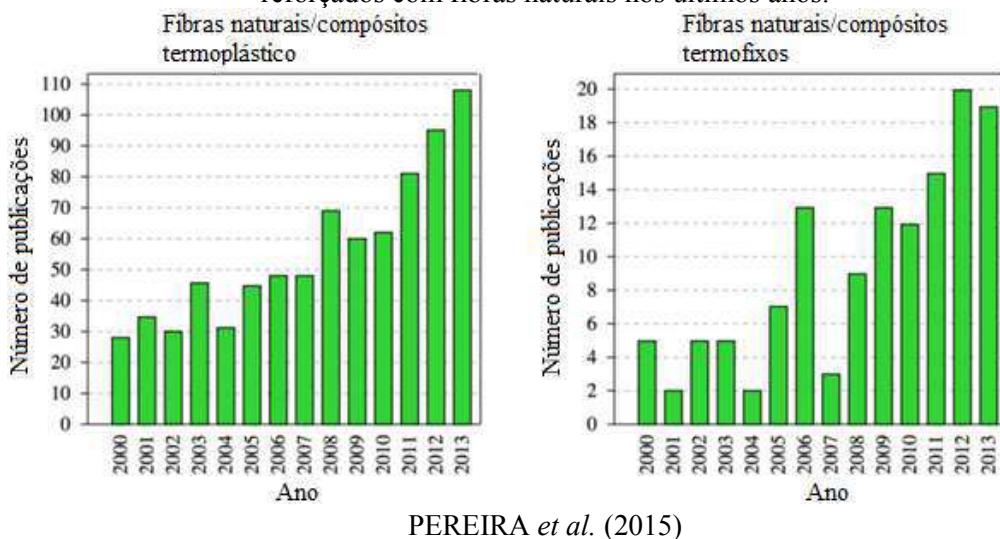
2.2.10 COMPÓSITOS DE FIBRAS NATURAIS

Nos últimos anos, a utilização de materiais compósitos reforçados com fibras naturais cresceu consideravelmente no setor da construção civil. A busca por materiais alternativos

que possibilitem a substituição das fibras sintéticas por fibras naturais apresentam vantagens sociais e econômicas, reduzindo o custo, impacto ambiental e consumo de energia. As fibras naturais estão disponíveis a baixo custo, são renováveis, biodegradáveis, abundantes em várias partes do mundo, apresentam boa relação resistência/peso e propriedades mecânicas adequadas para um grande número de aplicações (LIMA *et al.*, 2011).

O interesse pela utilização de fibras naturais refletiu em um aumento de pesquisas com ênfase na utilização destas fibras como reforço em compósitos de matrizes poliméricas. Um levantamento realizado por Pereira *et al.* (2015) verificou que as publicações sobre os compósitos reforçados com fibras naturais em matrizes termoplásticas e termofixas aumentaram consideravelmente ao longo dos anos, como ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Número de publicações relacionados a compósitos termoplásticos e termofixos reforçados com fibras naturais nos últimos anos.



PEREIRA *et al.* (2015)

As matrizes termoplásticas apresentaram um número mais expressivo de trabalhos publicados. O interesse no desenvolvimento de materiais ecologicamente viáveis e com o uso de matérias-primas provenientes de fontes naturais vem crescendo desde a última década, e revela uma área emergente de compósitos poliméricos. As fibras lignocelulósicas são consideradas inovação científica e tecnológica na área de materiais compósitos. A substituição das fibras sintéticas por fibras vegetais pode reduzir o custo final do material, e com o aumento da utilização deste tipo de compósito, a comercialização de fibras vegetais pode começar a ser feita em escala industrial e sustentável (PEREIRA *et al.*, 2015).

As fibras naturais quando aplicadas como reforço, apresentam algumas características que podem interferir nas propriedades finais dos compósitos. Fibras hidrofílicas são

incompatíveis com a maioria dos termoplásticos hidrófobicos, tais como polipropileno e polietileno, esse problema pode ser resolvido a partir dos diversos tratamentos de superfície. Os tratamentos geralmente são usados para remover constituintes amorfos, tais como hemicelulose e lignina, com o objetivo de obter o máximo de celulose quanto possível com os níveis mais elevados de cristalinidade, tendo em vista que as propriedades mecânicas e térmicas mais elevadas estão associadas ao conteúdo de celulose das fibras. Um grande número de fibras naturais vem sendo estudado para aplicações, como reforço de compósitos que utilizam matrizes termoplásticas ou termofixas, e as fibras mais utilizadas são sisal, juta, bambu, curauá, bagaço de cana e casca de coco verde (PEREIRA *et al.*, 2015). A Tabela 9 apresenta um resumo das fibras naturais mais usadas no reforço de matrizes termoplásticas e termofixas:

Tabela 9 – Compósitos termofixos e termoplásticos reforçados com diferentes fibras naturais.

Termoplástico	Fibras Vegetais
Polipropileno (PP)	curauá, linho, cascas de coco verde, cânhamo, juta, palma, sisal, bagaço de cana, palha de trigo
Polietileno (PE)	banana, cascas de coco verde, casca de arroz, sisal, bagaço de cana
Polietileno de Alta Densidade	banana, curauá, sisal, madeira
Poliestireno de Alto Impácto	cascas de coco verde, sisal, bagaço de cana
Termofíxo	Fibras Vegetais
Poliéster	bambu, banana, coco, curauá, linho, cânhamo, juta, abacaxi, sisal, bagaço de cana
Poliuretano (PU)	banana, coco, curauá, sisal
Epóxi	banana, coco, algodão, linho, cânhamo, juta, abacaxi, sisal
fenólico	banana, linho, juta, sisal
vinylester	coco, cânhamo, juta, abacaxi, sisal
Poliéster alifático biodegradável	bagaço de cana
Amido de milho	pseudocaule de banana, bagaço de cana, curauá
Amido / EVOH	coco
A proteína de soja	sisal

Fonte: Adaptado de PEREIRA *et al.* (2015).

Agopyan (1991) pesquisou as principais fibras vegetais disponíveis no Brasil e selecionou aquelas com propriedades mais adequadas para seu emprego na Construção Civil. Dentre as fibras disponíveis e com possibilidade de aplicação citam-se as de bambu, juta, malva, piaçava, rami, coco e sisal.

As fibras de rami e sisal tiveram excelente desempenho em pesquisas anteriores. Angelini *et al.* (2000), analisando as propriedades mecânicas de fibras de rami, obteve valores comparáveis às propriedades mecânicas das fibra de vidro E-glass, obtendo módulo de elasticidade de 65 GPa, enquanto as fibras de vidro apresentam módulo de 70 a 90 GPa. Já

Carvalho (2005), concluiu que as fibras de sisal apresentam vantagens quando comparados seu desempenho mecânico e preço unitário com outras fibras vegetais, além de custarem cerca de 11% do preço das fibras de vidro e 0,07 % das fibras de carbono. Portanto, estes valores confirmam ambas as fibras como potencial substituto das fibras sintéticas produzidas pelo homem em materiais compósitos.

Pesquisas anteriores realizadas por Souza e Cunha (2011); Soares (2012); Sousa (2013) e Briemel (2013), que sinalizaram para a possibilidade do uso dos compósitos com as fibras vegetais de maior resistência como reforço em estruturas de concreto armado, servindo de base para este trabalho.

Soares (2012) e Sousa (2013) produziram compósitos poliméricos por compressão à temperatura ambiente com diversos teores de fibras de rami, sisal e bucha vegetal. Estas fibras foram selecionadas devido as propriedades mecânicas adequadas, baixo custo e pela sua disponibilidade no país. Soares (2012) estudou compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de rami alinhadas unidirecionalmente, nos teores de 0%, 30%, 40%, 50% e 60% e tecidos de rami unidirecional de 50% em volume. A autora observou que o compósito com tecidos de rami com teor de 50% apresentou melhores propriedades mecânicas, obtendo resistência à tração de 126,3 MPa e módulo de elasticidade de 23,7 GPa.

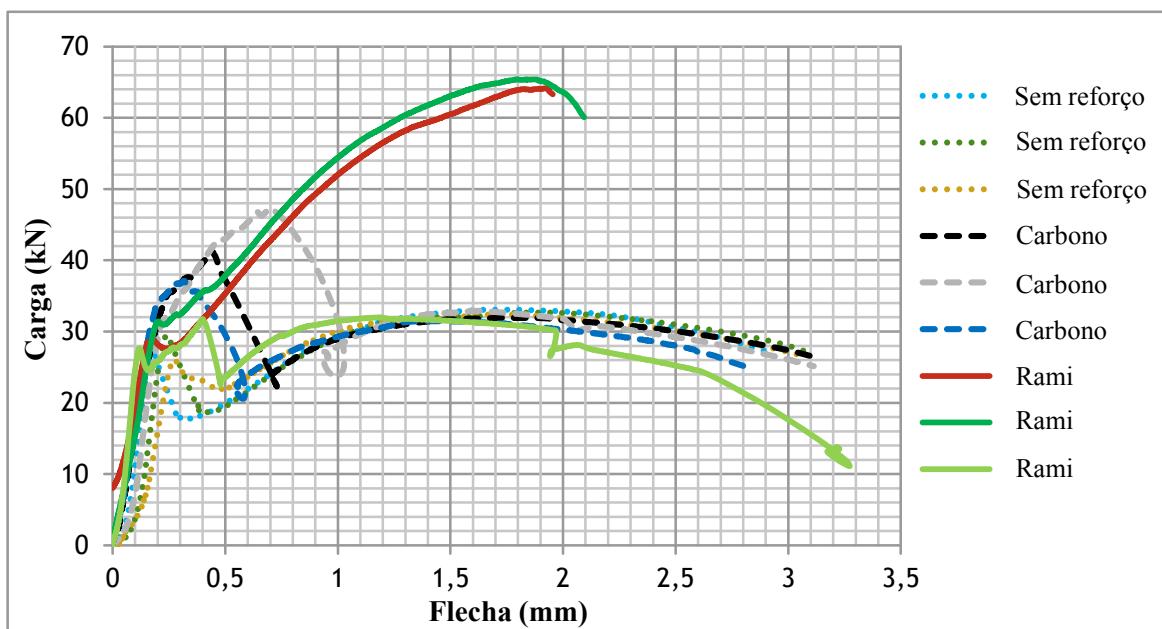
Souza (2013) avaliou compósitos de matriz poliuretana à base de óleo de mamona, estruturados com fibras unidirecionais e aleatórias de rami, sisal e bucha vegetal, com teores de 0%, 25%, 35%, 45% e 55% em volume. A autora observou que os compósitos de melhores propriedades mecânicas foram obtidos para fibras de rami (55%) e sisal (45%), alinhados unidirecionalmente, obtendo módulo de elasticidade na ordem de 22,00 GPa.

Souza e Cunha (2011) fizeram análises teórica e numérica dos compósitos de resina epóxi reforçadas com fibras de rami para uso como reforço estrutural, através do modelo micromecânico e método dos elementos finitos. Após as análises, os autores verificaram que os compósitos com teor de 70% de fibras de rami teriam um módulo de elasticidade de aproximadamente 30 GPa, simulado pelo programa ANSYS®, e 36 GPa através do método micromecânico. Para analisar o desempenho mecânico do reforço vegetal, foram modeladas no programa ANSYS® vigas de concreto armado sem reforço e reforçadas com PRFVeg e PRFC submetidas a cargas verticais. Os resultados obtidos mostraram bons desempenhos dos compósitos vegetais como reforço no combate à flexão e ao esforço cortante. Além disso,

verificou-se que o aumento da espessura dos compósitos vegetais melhora a eficiência no combate às tensões atuantes, tendo uma espessura de 4 à 6 vezes maior que os compósitos com as fibras de carbono para alcançar o mesmo desempenho mecânico. Portanto, com este módulo de elasticidade, os compósitos vegetais seriam viáveis para uso como reforço de vigas de concreto armado.

Para verificar a viabilidade do uso dos compósitos vegetais como reforço de estruturas de concreto, Briemel (2013) produziu em laboratório compósitos poliméricos de matriz epóxi reforçados com tecidos de rami, alinhados unidirecionalmente e moldados por compressão à temperatura ambiente, atingindo espessura de 5 mm. Em seguida, foram moldadas 9 vigas de concreto armado nas dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm, sendo 3 vigas sem reforço, 3 vigas reforçadas com os compósitos vegetais e 3 vigas reforçadas com os laminados de carbono. A Figura 39 apresenta os resultados obtidos na flexão das vigas de concreto armado reforçadas com os compósitos em estudo onde, apesar do número limitado de ensaios, foi possível verificar bons resultados para os compósitos com tecidos de rami alinhados, sinalizando positivamente para viabilidade da aplicação dos compósitos vegetais como reforço de estruturas de concreto armado.

Figura 39 – Resultados obtidos (Carga x Flecha) em vigas de concreto armado não reforçadas e reforçadas com compósitos de epóxi/fibras de carbono e epóxi/fibras de rami.



Fonte: Adaptado de BRIEMEL (2013).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho foi dividido em duas etapas. Na primeira, foram produzidos, por compressão a temperatura ambiente, compósitos de resina epoxídica com diferentes teores de fibras e tecidos de rami e sisal. As fibras foram posicionadas de forma contínua e alinhada para otimização das propriedades mecânicas. Após a produção, foi realizada a caracterização das propriedades mecânicas dos compósitos e aqueles com melhores propriedades foram selecionados para aplicação posterior como reforço de vigas de concreto. Foram realizadas simulações numéricas, utilizando o método dos elementos finitos, analisando os esforços em viga reforçada com PRFC, com o objetivo de determinar a espessura necessária do composto de PRFVeg, para obter o desempenho similar ao composto com fibras de carbono. A segunda etapa do trabalho consistiu na produção de vigas de concreto armado e reforço destas com os compósitos produzidos, para avaliação de desempenho à flexão, em que os resultados obtidos foram analisados e comparados com vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono. Ao terminar a parte experimental, foram realizados estudos de viabilidade econômica e estrutural dos reforços produzidos, comparados com os laminados de carbono.

3.2 MATERIAIS DOS COMPÓSITOS

O programa experimental proposto utilizará na confecção dos polímeros reforçados com fibras os materiais relacionados na Tabela 10.

Tabela 10 – Materiais utilizados para a produção dos compósitos.

Tipo de fibra	Direção de fibras/fios	Matriz
Carbono	Unidirecional	Epóxi
Fibra de sisal		
Tecido de rami		
Tecido de sisal		

Fonte: AUTOR.

As fibras de rami e sisal foram escolhidas como reforço nos compósitos estudados, considerando suas propriedades mecânicas, como já destacado no capítulo anterior. A escolha dos laminados de carbono, foi devido à base teórica já existente sobre seu comportamento e aplicação, como reforço em estruturas de concreto. Neste trabalho foram adotados arranjos orientados unidirecionalmente com tecidos e mechas, visto que, é conveniente alinhar as fibras na direção dos esforços principais atuantes nos compósitos para otimizar seu desempenho. A resina epóxi foi selecionada por apresentar excelentes propriedades mecânicas, boa compatibilidade, pequena contração durante a cura e aderência com as fibras vegetais, além de estabelecer base comparativa com as fibras de carbono, uma vez que a matriz de todas foram as mesmas.

3.2.1 FIBRAS E FIOS

As fibras de sisal e os fios de rami e sisal foram adquiridos da empresa Sisalsul Indústria e Comércio Ltda., situada na cidade de São Paulo. As fibras de sisal utilizadas foram classificadas como longas do tipo 2. A Figura 40 apresenta: a) a fibra de sisal com coloração pardacenta e ausência de impurezas, b) os fios de sisal e c) os fios de rami.

Figura 40 – Fibras e fios.



a) Fibras de sisal

b) Fios de sisal

c) Fios de rami

Fonte: AUTOR.

3.2.2 TECIDOS

Os tecidos por sua vez foram selecionados a fim de controlar a homogeneidade dos laminados, garantindo a uniformidade do arranjo, orientação, distribuição e o teor de fibras. Assim, um novo tecido alternativo foi desenvolvido e avaliado como reforço de compósitos estruturais.

Os tecidos foram produzidos com os fios de rami e sisal pelo Centro de Fiação e Tecelagem de Uberlândia. Estes tecidos são formados pelo trançado de fios (rami e sisal) torcidos, onde

as urdiduras foram confeccionadas com fio de algodão, e as tramas com fios de rami e sisal respectivamente. Os fios apresentaram diâmetro de 1 mm para rami e 2 mm para sisal, com espaçamento entre fios de 0,5 mm. O arranjo do tecido de rami e sisal está apresentado na Figura 41.

Figura 41 – a) tecido de rami e b) tecido de sisal.



a)

b)

Fonte: AUTOR.

Estes tecidos foram desenvolvidos com o objetivo de se obter a maior quantidade de fios em uma única direção (trama) e a menor quantidade de fios transversais (urdiduras).

3.2.3 RESINA

A resina utilizada é constituída por um sistema resultante da reação da epicloridrina com o bisfenol A, modificada com extensores reativos alifáticos, e o endurecedor à base de poliamina modificada, ambos adquirido da Avipol Ltda (Figura 42).

Figura 42 – Produtos para composição da resina epóxi utilizada.



a) Componente A

b) Componente B

Fonte: AUTOR.

A Tabela 11 e Tabela 12 apresentam, segundo o fabricante, as características da resina epóxi, endurecedor, e as propriedades do sistema não curado.

Tabela 11 – Características dos componentes, resina epóxi e endurecedor.

Características	Resina epóxi	Endurecedor
Aparência	Líquido incolor viscoso	Líquido âmbar
Viscosidade, 20°C, g/cm³	500 a 800	3000 +/- 1000
Peso Específico, 20°C, g/cm³	1,12 +/- 0,01	1,10 +/- 0,005
Peso epóxi equivalente (EEW)	195 – 215	-

Tabela 12 – Propriedades do sistema não curado

Proporção de mistura (Resina: Endurecedor)	100:23 partes em peso
Temperatura de manipulação (°C)	18-30
Tempo de utilização da mistura 100g (gel time) a 25°C	15 a 20 min
Tempo de endurecimento da mistura (100g, 20°C)	2 a 4 horas
Cura a 20°C	48 a 72 horas

Em testes realizados previamente, observou-se que a melhor proporção resina:endurecedor, para que a viscosidade se mantivesse ótima para trabalho durante os primeiros 15 minutos, foi igual a 100:15 em massa, portanto, adotou-se esta proporção, em vez de 100:23, como recomendado pelo fabricante.

A massa específica da resina epóxi após a cura foi obtida por Soares (2012), que calculou a média da relação entre massa e volume de três corpos de prova cilíndricos moldados e curados, utilizando as mesmas proporções adotadas na confecção dos compósitos. O valor médio obtido foi de 1,15 g/cm³.

3.2.4 LAMINADOS DE CARBONO

Na condução do programa experimental, foi utilizado laminado de carbono do tipo Sika® CarboDur® S 512, adquiridos da empresa Sika, para o estudo de reforço em vigas de concreto armado. O laminado é reforçado unidirecionalmente com fibras de carbono, apresentando espessura de 1,2 mm e largura de 50 mm. As características deste laminado, segundo informações do fabricante, estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades físicas do laminado fornecidas pelo fabricante.

Propriedades	Valores
Base	Fibras de carbono em matriz epóxi
Conteúdo de fibras em volume	> 68%
Densidade	1,6 g/cm ³
Resistência à temperatura	> 100 °C
Largura	50 mm
Espessura	1,2 mm
Módulo de elasticidade	165.000 MPa
Resistência à tração	2.400 MPa
Resistência à tração na ruptura	3.100 MPa
Deformação	> 1.7%

Fonte: CATÁLOGO DO FORNECEDOR.

3.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS: FASE – 1

Como visto na revisão bibliográfica, Soares (2012) e Sousa (2013) produziram e caracterizaram compósitos de fibras vegetais com teores de 0% até 60% de fibras em volume, e verificaram que, com a incorporação de maiores teores de fibras na matriz, houve um aumento no módulo de elasticidade. Os compósitos com melhores propriedades mecânicas alcançados pelas autoras foram para as fibras de sisal e tecidos de rami alinhados unidirecionalmente com teores de 45% e 50% respectivamente. Assim, na busca de alcançar compósitos com melhores propriedades mecânicas, esta pesquisa propôs continuar os estudos realizados pelas autoras, produzindo compósitos com incorporação acima de 50% de fibras/tecidos de sisal e tecidos de rami, até alcançar o limite máximo de incorporação de fibras na matriz. Portanto, nesta fase foram avaliados os diversos polímeros reforçados com fibras vegetais produzidos, avaliando a influência da variação do tipo de fibra/tecido e o seu teor nas propriedades mecânicas, e os polímeros com fibras de carbono disponíveis no mercado, como descrito na tabela Tabela 14.

Tabela 14 – Descrição dos grupos ensaiados na primeira fase.

Tipo de Fibra	Teor em volume (%)	Direção das Fibras/Tecido	Matriz
PRFC	68		
	50		
Fibra de sisal	60		
	70		
	50	Unidirecional	Epóxi
Tecido de rami	60		
	70		
	50		
Tecido de sisal	60		
	70		

Fonte: Autor.

3.3.1 PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL

As fibras de sisal foram selecionadas e umedecidas para facilitar seu processo de alinhamento. Os feixes de fibras de sisal, com comprimento de aproximadamente 25 cm, foram cortados e alinhados unidirecionalmente sob uma folha de papel filtro, com dimensões de 19,5 cm x 20,5 cm como ilustrado na Figura 43. Foram produzidas diversas camadas, de modo que cada camada ficasse sobrepostas até atingir a massa de fibras necessária para o teor específico proposto neste estudo.

Figura 43 – Corte e alinhamento das fibras de sisal.



Fonte: AUTOR.

A moldagem dos compósitos foi precedida pela secagem das fibras. O procedimento de secagem foi feito conforme Souza (2013), colocando as fibras em estufa à temperatura de 60°C +/- 5°C durante 24 horas, e posteriormente mantidas em dessecador até a data de moldagem dos compósitos. Este processo é justificado, pois as fibras vegetais apresentam variações em seu volume com a mudança do teor de umidade, resultando em perda de aderência com a resina. A Figura 44 apresenta os laminados após secagem.

Figura 44 – Laminados de fibras de sisal após secagem.

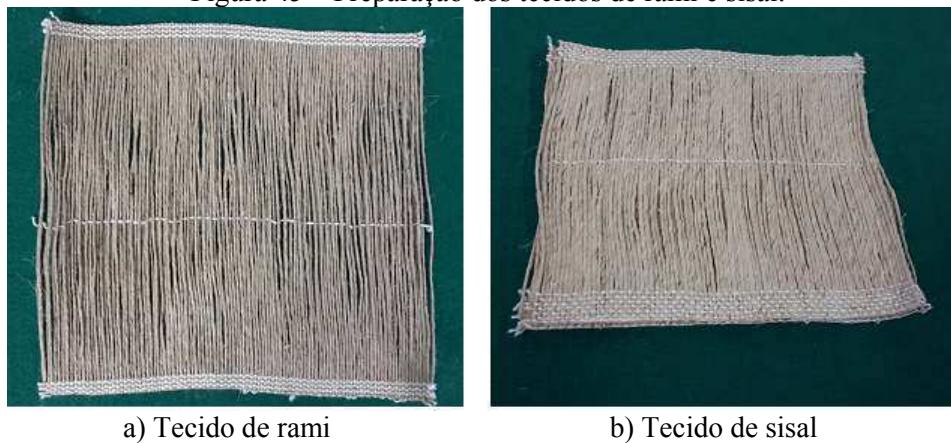


Fonte: AUTOR.

3.3.2 PREPARAÇÃO DOS TECIDOS DE RAMI E SISAL

A preparação dos tecidos foi mais fácil em comparação com as fibras, pelo fato de ser pré-processado. Os tecidos de rami e sisal foram cortados nas dimensões de 19,50 cm x 20,50 cm, em seguida secos em estufa, seguindo os mesmos procedimentos para as fibras de sisal. A Figura 45 ilustra os tecidos de rami e sisal prontos para moldagem.

Figura 45 – Preparação dos tecidos de rami e sisal.



a) Tecido de rami

b) Tecido de sisal

Fonte: AUTOR.

Ressalta-se que, com as fibras de rami, foram preparados compósitos apenas com os tecidos, pois os estudos de Soares (2012) demonstraram que os compósitos com fios de rami alinhados apresentaram melhores propriedades quando comparados àqueles com fibras alinhadas no mesmo teor.

3.3.3 PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DOS COMPÓSITOS

Os compósitos foram preparados por moldagem à compressão em temperatura ambiente, utilizando fôrmas metálicas com dimensões internas de 20,5 cm x 20,5 cm x 2,5 cm, e uma prensa hidráulica, da marca EMIC, modelo PCN 100/20, com capacidade de 1200 kN. Foram utilizados calços no fundo do molde com espessura de 3 mm, para alcançar a espessura desejada. As fôrmas foram limpas e revestidas com filme de PVC para facilitar a desmoldagem e preservar o equipamento limpo como ilustrado na Figura 46.

Figura 46 – Preparação para a moldagem dos compósitos.



Fonte: AUTOR.

As massas de fibras, tecidos e resina necessárias para produzir compósitos com diferentes teores de fibras, foram determinadas considerando a massa específica da fibra e tecido de

sisal igual a 1,511 g/cm³, do tecido de rami igual a 1,590 g/cm³ e da resina 1,15 g/cm³ (SOARES, 2012; SOUSA, 2013). A Tabela 15 e Tabela 16 apresentam as massas dos materiais utilizados na produção dos compósitos de PRFVeg, com diferentes teores de fibras.

Tabela 15 – Massa da resina e tecidos de rami para moldagem dos PRFVeg.

Tipo de Compósito	Teor de fibras em volume (%)	Massa da fibra (g)	Massa da resina (g)
1	50%	95,34	68,96
2	60%	114,41	55,17
3	70%	133,48	41,37

Fonte: AUTOR.

Tabela 16 – Massa da resina, fibras e tecidos de sisal para moldagem dos PRFVeg.

Tipo de Compósito	Teor de fibras em volume (%)	Massa da fibra (g)	Massa da resina (g)
1	50%	90,60	68,96
2	60%	108,72	55,17
3	70%	126,84	41,37

Fonte: AUTOR.

A moldagem foi constituída da mistura de resina e endurecedor até obter uma mistura homogênea. Para facilitar o contato da resina com todas as fibras, foram inseridas camadas alternadas de resina e fibras/tecido alinhadas unidirecionalmente, procedendo com o adensamento manual das fibras para cada camada, sendo a variação do número de camadas em função da porcentagem de fibras/tecido. As placas dos compósitos foram fixadas com espessura de 3 milímetros, apresentando volume igual a 119,93 cm³. O tempo de preparação dos compósitos variou de 10 a 15 min. Para garantir a molhabilidade das fibras e minimizar vazios no interior dos compósitos, adicionou-se um excesso de resina, que foi eliminado posteriormente durante a moldagem por compressão. Após o adensamento da última camada de fibras/tecido, a fôrma metálica foi fechada e colocada em uma prensa hidráulica. Foi aplicada a carga necessária para atingir a espessura fixada de 3 mm. O compósito foi deixado na prensa por 24 horas e no molde em processo de cura por 48 horas. A cura dos compósitos foi feita em temperatura ambiente entre 25°C e 30°C. A Figura 47 ilustra todas as etapas.

Após a retirada dos compósitos das fôrmas, as placas passaram pelo processo de lixamento, para retirar o excesso de resina nas bordas (rebarbas), e posteriormente foi medida a massa e conferidas as dimensões de cada placa do compósito e o teor de fibras atingido.

Figura 47 – Etapas da preparação dos compósitos vegetais para testes de tração.

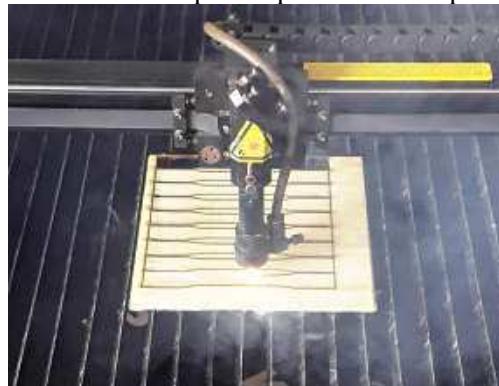


Fonte: AUTOR.

3.3.4 PREPARAÇÃO E CORTE DAS AMOSTRAS DOS COMPÓSITOS VEGETAIS

Foram cortados 81 corpos de prova, no sentido da orientação das fibras, em uma máquina a laser, da marca ROUTER (Figura 48), para realizar o ensaio de tração.

Figura 48 – Corte dos corpos de prova dos compósitos a laser.



Fonte: AUTOR.

Foi preparado um total de 9 placas de compósitos, sendo 9 corpos de prova para cada fração de fibras e tecidos, que variaram de 50%, 60% e 70% (Figura 49, Figura 50 e Figura 51).

Figura 49 – Compósito de resina epóxi reforçado com fibras de sisal para testes de tração.



a) Placa moldada

b) Corpos de prova

Fonte: AUTOR.

Figura 50 – Compósito de resina epóxi reforçado com tecidos de sisal para testes de tração.



a) Placa moldada

b) Corpos de prova

Fonte: AUTOR

Figura 51 – Compósito de resina epóxi reforçado com tecidos de rami para testes de tração.



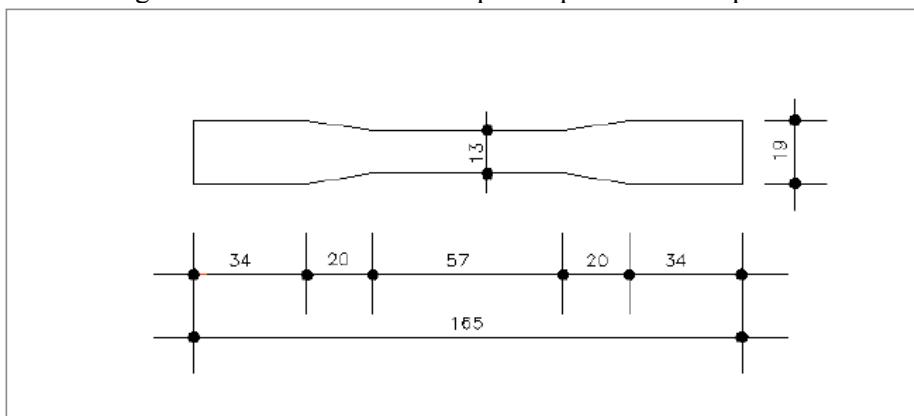
a) Placa moldada

b) Corpos de prova

Fonte: AUTOR

Os corpos de prova foram cortados nas dimensões recomendadas pela norma ASTM D638:2012, conforme a Figura 52.

Figura 52 – Dimensões dos corpos de prova dos compósitos.



Fonte: AUTOR.

3.3.5 ENSAIO À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS VEGETAIS

Os ensaios à tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios Instron, modelo 5982, com capacidade de carga 100 kN, seguindo as recomendações da ASTM D3039:2014. Para a medição das deformações, foi utilizado um extensômetro da marca Instron, com capacidade de alongamento máximo de 25 mm. A força de tração foi aplicada com velocidade de 2 mm/min até a ruptura do compósito. Durante todo o teste foram registrados os dados de força e deformação, através de um sistema de aquisição de dados da própria Instron. O módulo de elasticidade do compósito foi determinado para um trecho de variação das deformações específicas de 1% e 3%. No ensaio foram determinados: módulo de

elasticidade longitudinal, limite de resistência à tração longitudinal e limite de deformação à tração longitudinal. Na realização dos ensaios, os corpos de prova devem ser alinhados com o eixo vertical da prensa, evitando torções ou rupturas prematuras, e as garras da prensa devem ter uma pressão suficiente para que não ocorra deslizamento do corpo de prova durante o ensaio. A Figura 53 apresenta a configuração de ensaio dos compósitos vegetais.

Figura 53 – Ensaio de tração dos compósitos com fibras vegetais.



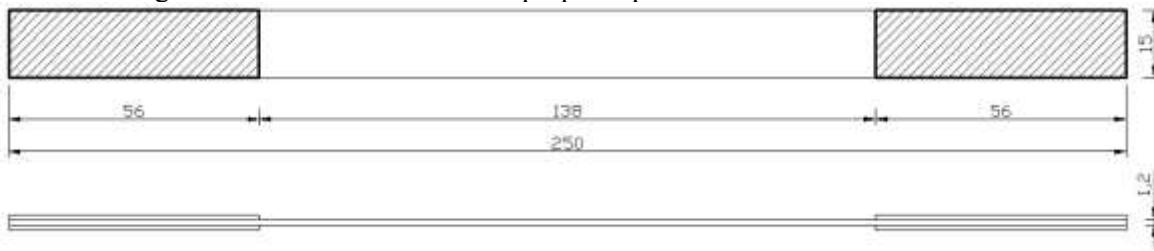
Fonte: AUTOR.

3.3.6 ENSAIO À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE CARBONO

Foram realizados ensaios de tração dos laminados de carbono, de modo a comparar valores das suas propriedades com os indicados no catálogo do fornecedor, e posteriormente analisar as estruturas reforçadas no programa ANSYS® com as propriedades adquiridas neste ensaio.

O ensaio foi realizado de acordo com a ASTM D3039:2014. A determinação de suas dimensões depende da orientação e quantidade das fibras e sua espessura. Foram preparadas cinco amostras com 250 mm de comprimento e 15 mm de largura cada. Na região da garra foram coladas pastilhas (tabs), confeccionados com o laminado, com comprimento de 56 mm, para que a aplicação da força seja bem sucedida, impedindo falhas prematuras, como o esmagamento do compósito nesta região ou escorregamento. A norma recomenda o uso de cola instantânea que possua um elevado alongamento, e que seja aplicado de forma retilínea e uniforme, evitando concentração de tensões. A Figura 54 ilustra a configuração da geometria das amostras, apropriada para este trabalho e a Figura 55 apresenta os corpos de prova cortados conforme ASTM D3039:2014.

Figura 54 – Geometria de ensaio proposto pela norma ASTM D3039:2014.



Fonte: AUTOR.

Figura 55 – Corpos de prova para ensaio à tração dos laminados de carbono.



Fonte: AUTOR.

Com uso de um paquímetro digital foram tomadas as dimensões, como espessura e largura, em três pontos aleatórios em cada amostra. A Tabela 17 apresenta as dimensões recolhidas das amostras.

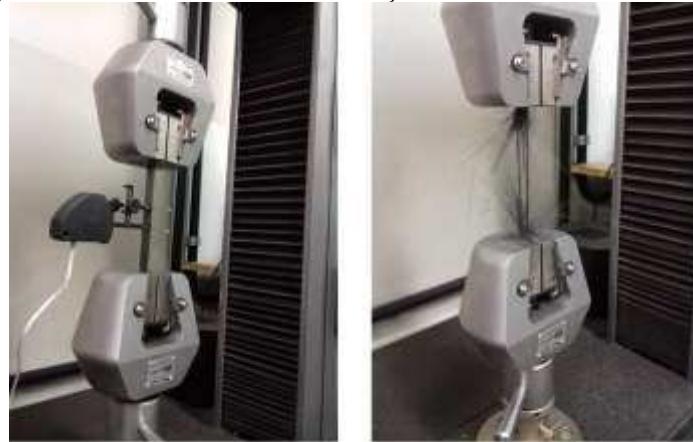
Tabela 17 – Dimensões das amostras dos laminados de carbono.

Amostra	Esp. Esquerda	Esp. Meio	Esp. Direita	Média	Larg. Esquerda	Larg. Meio	Larg. Direita	Média
1	1,27	1,28	1,37	1,24	14,41	13,7	14,54	15,34
2	1,33	1,26	1,36	1,32	13,16	13,83	13,42	13,47
3	1,26	1,26	1,36	1,29	13,97	14,17	13,21	13,78
4	1,25	1,24	1,33	1,27	14,74	14,95	15,57	15,09
5	1,23	1,24	1,24	1,24	15,47	15,47	15,07	15,34
				1,27				
								14,60

Fonte: AUTOR.

Em seguida, as amostras foram submetidas ao ensaio à tração, seguindo os mesmos procedimentos adotados nos ensaios dos compósitos vegetais. A Figura 56 apresenta os detalhes. Neste ensaio foram determinados: módulo de elasticidade longitudinal, limite de resistência à tração longitudinal e limite de deformação à tração longitudinal.

Figura 56 – Detalhes de ensaio à tração dos laminados de carbono.



a) Corpo de prova antes da ruptura b) Corpo de prova após ruptura
Fonte: AUTOR.

3.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DAS ESTRUTURAS REFORÇADAS

Com o objetivo de analisar a viabilidade do reforço de fibras vegetais, foram feitas simulações numéricas em vigas de concreto armado, reforçadas com PRFVeg, e com laminados de carbono (PRFC). A ideia é comparar o desempenho estrutural (capacidade de reforço) dos compósitos com fibras vegetais em relação aos de carbono. Inicialmente foi feito um modelo numérico, constituído por uma viga armada e reforçada com uma camada de laminado de carbono, impondo uma carga qualquer para simular as tensões normais no concreto na região tracionada. Posteriormente, esta carga foi então transferida ao modelo numérico de viga reforçada com PRFVeg, onde a espessura do reforço do compósito de fibras vegetais foi ajustada até que se tivesse o mesmo desempenho estrutural do PRFC. O desempenho estrutural foi dado pela medida das tensões e deformações nos dois modelos. Conhecida a espessura, foram produzidos estes compósitos em laboratório para realização do ensaio experimental, que está descrito no item 3.5 deste trabalho. Em seguida foi comparado os resultados da simulação com os experimentais, efetuando ajustes, se necessário.

A modelagem numérica foi feita pelo Método dos Elementos Finitos, usando-se o programa ANSYS®, que possui elementos específicos de materiais compósitos.

3.4.1 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

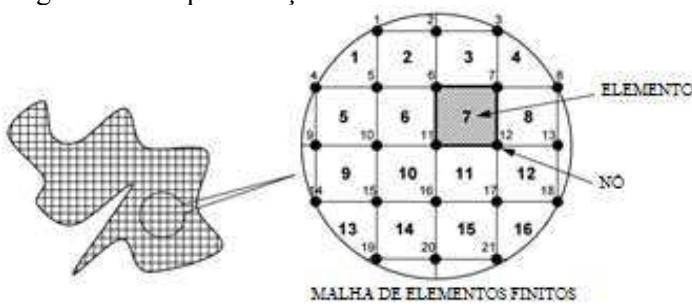
O método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico utilizado para obter a solução aproximada de problemas físicos, modelados através de equações diferenciais parciais. Trata-se de uma simulação computacional, que permite a execução de múltiplas análises, de

forma rápida e eficiente. Problemas na Engenharia Civil envolvendo cálculos complexos, demandavam tempo e produziam aproximações insatisfatórias. O desenvolvimento de métodos computacionais para realizar cálculos e aproximações começaram a ganhar destaque, por permitir fácil modelagem e por apresentar resultados satisfatórios de simulação. Com isso, surgiram então o Método dos Elementos Finitos (MEF), Método de Volumes Finitos (MVF), métodos de elementos de contorno (MEC) e de diferenças finitas (MDF) (CHAVES, 2010; VIEIRA; CUNHA, 2012).

O modelo numérico computacional permite a obtenção e análise de resultados com economia de tempo e custos, podem ser facilmente realizadas variações nas condições de carga, apoio e geometria do elemento, permitindo identificar as zonas de maior solicitação de esforços para realizar um dimensionamento eficiente do reforço (FERREIRA; CUNHA, 2013; VIEIRA; CUNHA, 2012).

O MEF é um processo de discretização, que consiste em dividir o domínio sobre o qual o problema é estudado em várias regiões interconectadas, denominadas *elementos*. No processo de discretização, as incógnitas do problema passam a ser os valores das variáveis de campo nos pontos nodais. Após estabelecer um número finito de incógnitas, podem ser empregadas funções de interpolação, para fornecer valores das variáveis de campo no interior dos elementos. A precisão do modelo depende do número de elementos e das funções de forma empregadas. Na discretização via MEF, no interior de cada elemento, são admitidas soluções aproximadas para as variáveis de campo, expressas como funções arbitrárias dos valores que as incógnitas assumem nos *nós* (valores nodais). Estas funções são denominadas *funções de interpolação* ou *funções de forma*. A união de todos os elementos com seus nós forma a malha de elementos finitos, sendo exemplificada na Figura 57. Devem ser impostas algumas condições para garantir a continuidade da solução entre os elementos (CHAVES, 2010).

Figura 57 – Representação da malha de elementos finitos.



Fonte: Adaptado de CUNHA (2012).

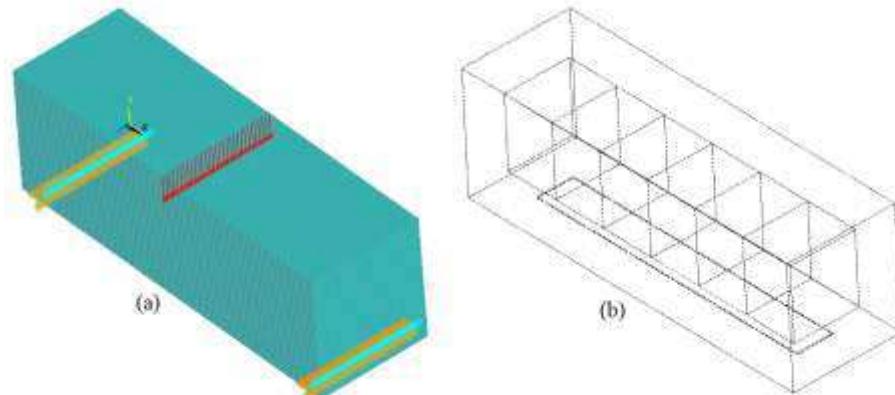
Nas Engenharias, o método pode ser aplicado em Mecânica dos Sólidos (estática e dinâmica), Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Eletromagnetismo. Em termos de problemas práticos, como na pesquisa ou em aplicações industriais, há um grande número de problemas que podem ser analisados via MEF. Segundo Chaves (2010), para a utilização eficiente do MEF, feita através do ANSYS®, algumas etapas devem ser previamente definidas:

- a) Tipo de elemento a ser utilizado (viga, placa, coluna etc.);
- b) Propriedades mecânicas do material (propriedades elásticas, físicas etc.);
- c) Propriedades geométricas (área e inércia da seção transversal etc.)
- d) Geração do modelo (malha de elementos finitos: nós e elementos);
- e) Aplicação das forças atuantes na estrutura;
- f) Imposição das condições de contorno (condições de apoio);
- g) Tipo de cálculo a ser efetuado (estático, dinâmico, flambagem etc.);
- h) Análise dos resultados (listar, gerar gráficos e exportar).

3.4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO PROGRAMA ANSYS®

Foi modelada uma viga de concreto armado, bi-apoiada, com f_{ck} igual a 25 MPa e dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm, tendo vão entre apoios de 45 cm e reforçada com uma lâmina de PRFC. Esta foi a viga de referência para comparação com a viga reforçada com PRFVeg (Figura 58).

Figura 58 – Modelagem de viga bi-apoiada reforçada com PRFC. (a) Condições de contorno e de carregamento; (b) Detalhes da armadura e da posição do reforço.



Fonte: ANSYS® (2014).

Esta viga foi armada possuindo armaduras com barras de 5 mm de diâmetro, sendo a longitudinal composta por 2 barras, inferior e superior, e os estribos espaçados a cada 7,3

cm. O modelo foi submetido a um carregamento vertical concentrado na região central da viga, com carga de 50 kN distribuído ao longo da seção transversal.

Na análise do combate ao momento fletor, a faixa de PRFC foi posicionada no centro da superfície inferior da viga, região onde as tensões normais são maiores, tendo o reforço um formato de uma faixa de 5 cm x 40 cm.

Nesta modelagem foram consideradas as propriedades descritas na Tabela 18.

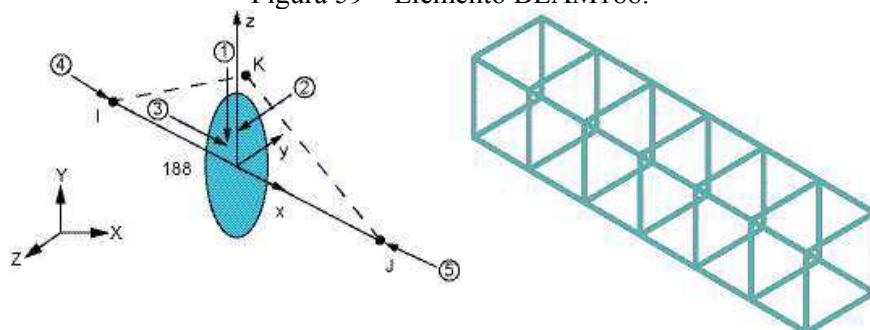
Tabela 18 – Propriedades utilizadas na modelagem da viga reforçada com PRFC.

Propriedades	Descrição	Valor
ϕ	Diâmetro das barras	5 mm
b_w	Largura da seção da viga	15 cm
h	Altura da seção da viga	15 cm
C	Comprimento da viga	50 cm
w	Largura da faixa de PRFC	5 cm
e	Espessura da camadas de PRFC	1,2 mm
E_s	Módulo de elasticidade do aço	21000 kN/cm ²
E_{con}	Módulo de elasticidade do concreto	3212,0 kN/cm ²
E_f	Módulo de elasticidade do PRFC	16681,5 kN/cm ²
ν_s	Coeficiente de Poisson do aço	0,3
ν_c	Coeficiente de Poisson do concreto	0,2
ν_f	Coeficiente de Poisson do PRFC	0,27
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão	2,5 kN/cm ²

Fonte: AUTOR.

Para a modelagem de cada elemento da viga reforçada, adotou-se um respectivo elemento tridimensional básico do ANSYS®. Para representação das armaduras, utilizou-se o elemento BEAM188, trata-se de um elemento linear, quadrático ou cúbico com 3 nós, cada nó pode apresentar seis ou sete graus de liberdade: translação nas direções dos eixos x, y e z, rotação em x, y e z. Este elemento inclui termos de rigidez, permitindo análises de flexão e torção (ANSYS®, 2014). O elemento é ilustrado na Figura 59.

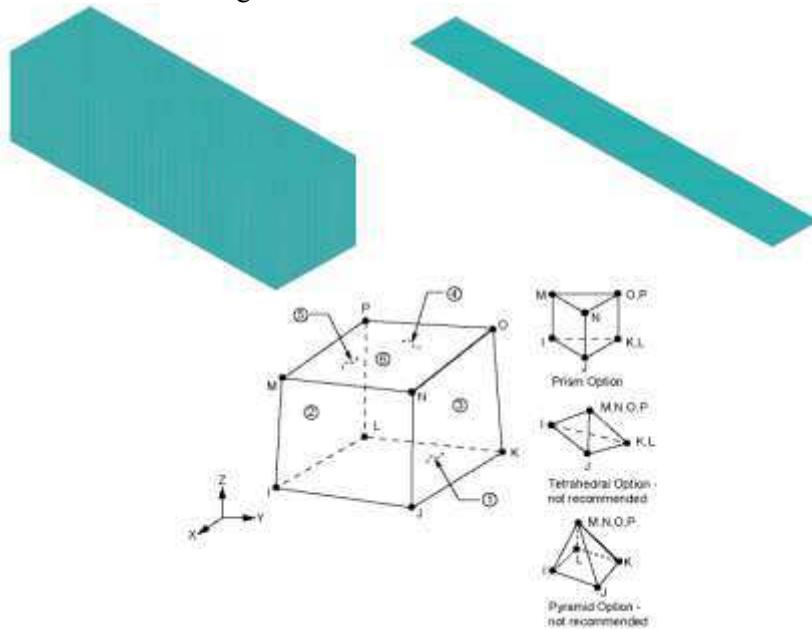
Figura 59 – Elemento BEAM188.



Fonte: ANSYS® (2014).

O elemento adotado para o concreto e para as faixas de PRFC e PRFVeg foi o SOLID185, apropriado para modelar estruturas sólidas em três dimensões. Ele apresenta oito nós e três graus de liberdade em cada nó: translação nas direções x, y e z (ANSYS®, 2014). Os compósitos foram modelados como sendo um único material, tendo a espessura inicial baseada na dos reforços de PRFC já existente no mercado. A geometria e os nós para este tipo de elemento estão ilustrados na Figura 60.

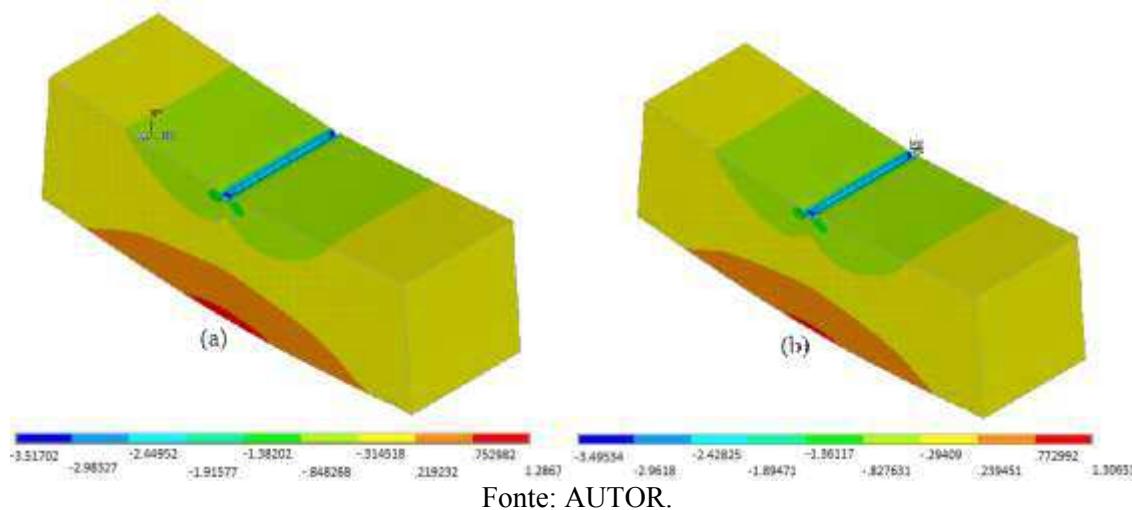
Figura 60 – Elemento SOLID185.



Fonte: ANSYS® (2014).

A título ilustrativo, é apresentada na Figura 61 a distribuição das tensões na viga sem reforço e reforçada com PRFC (uma camada), avaliando a ação do reforço de PRFC no alívio das tensões atuantes no concreto.

Figura 61 – Tensões normais antes (a) e após (b) a colagem do reforço (kN/cm²).



Fonte: AUTOR.

Finalizada a simulação numérica da viga reforçada com PRFC e conhecida as tensões normais no concreto na região tracionada, transferiu-se a carga para o modelo numérico com as fibras vegetais (PRFVeg), o qual sofreu variação na espessura, para alcançar desempenho estrutural semelhante com os dos PRFC. Foram simuladas diversas situações para uma espessura específica, onde foi obtida a espessura de 5,5 mm para o compósito com fibras de sisal e 5,6 mm para o compósito com tecido de rami, alcançando desempenho semelhante aos laminados de carbono. As propriedades mecânicas adotadas para esses compósitos vegetais foram retiradas de ensaios realizados anteriormente (Fase 1), onde os compósitos com melhores desempenhos foram para os PRFVeg com tecido de rami e fibras de sisal, com teores de 70% de fibras, o qual obteve módulo de elasticidade de 3512 kN/cm² e 3580 kN/cm² respectivamente. Foi adotado o mesmo coeficiente de Poisson para os laminados de PRFC. A Tabela 19 apresenta os diferentes resultados do reforço no combate ao momento fletor e comparados com as vigas sem reforço.

Tabela 19 – Resultados das diferentes modelagens do reforço no combate ao momento fletor.

	Espessura do Reforço (cm)	Deslocamento Máximo (cm)	Rigidez (%)	Tensão (kN/cm ²)		Resistência (%)
Sem Reforço	----	0,014977	----	Superior	0,84247	----
				Inferior	0,91684	----
Com Reforço-Fibra de Carbono	0,127	0,014659	2,12	Superior	0,81957	2,72
				Inferior	0,83921	8,47
Com Reforço-Fibra de Rami	0,56	0,014662	2,10	Superior	0,81943	2,73
				Inferior	0,83975	8,41
Com Reforço-Fibra de Sisal	0,55	0,014662	2,10	Superior	0,81945	2,73
				Inferior	0,83977	8,41

Fonte: AUTOR.

Os valores de rigidez e resistência da Tabela 19 foram calculados da seguinte forma:

$$R_{ix} = \frac{(d_0 - d_x)}{d_0} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

$$R_{ex} = \frac{(\sigma_0 - \sigma_x)}{\sigma_0} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

R_{ix} : rigidez da viga com reforço de espessura x (%);

d_0 : deslocamento máximo da viga sem reforço (cm);

d_x : deslocamento máximo da viga com reforço de espessura x (cm);

R_{ex} : resistência da viga com reforço de espessura x (%);

σ_0 : tensão normal na região central inferior ou superior da viga sem reforço (kN/cm²);

σ_x : tensão normal na região central inferior ou superior da viga com reforço de espessura x (kN/cm²).

Com base nos resultados experimentais obtidos no item 3.5 (Fase 02), ajustaram-se os parâmetros adotados nos modelos e simularam-se situações não realizadas experimentalmente, extrapolando-se os resultados para novas peças próximas as situações reais de serviço, de modo a avaliar a viabilidade estrutural prática do uso do reforço em PRFVeg em comparação com o reforço de PRFC (Seção 4.3).

3.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS COMPÓSITOS COMO REFORÇO: FASE – 2

Esta fase do trabalho tem como propósito, uma vez caracterizadas as propriedades dos PRFC e PRFVeg, avaliar o desempenho dos compósitos como reforço estrutural, pela eficiência dos valores obtidos de incremento de capacidade de carga.

Foram avaliados de forma comparativa, o desempenho do reforço variando o tipo de fibras de reforço nos PRFVeg e ancoragem na estrutura, de forma a avaliar a melhor condição de reforço e método de ancoragem. Para tanto, foram produzidas 24 vigas de concreto armado, divididas em 7 grupos. Um destes grupos denominado “controle” forneceu dados para aferir o reforço a ser aplicado nas demais vigas. Os grupos RC, RR e RS forneceram resultados com distintos compósitos de reforço ancorados pela colagem de PRF na superfície do concreto com um acabamento chanfrado nas laterais (CSCC) e os grupos RCE, RRE e RSE forneceram resultados com distintos compósitos ancorados pela colagem de PRF em entalhes na camada de cobrimento do concreto (CEC), sendo os grupos RC e RCE reforçados com PRFC, os grupos RR e RRE reforçados com o compósito com tecidos de rami com melhores propriedades mecânicas encontrado na fase 1 e os grupos RS e RSE reforçados com o compósito com fibras de sisal com melhores propriedades mecânicas encontrado na fase 1 deste trabalho. A Tabela 20 descreve o número de vigas reforçadas com os respectivos compósitos.

Tabela 20 – Descrição dos grupos ensaiados na segunda fase do estudo.

Grupo	CP (Viga)	Reforço	Ancoragem	Dimensões das vigas					
				b (cm)	h (cm)	l (cm)			
Controle	1, 2 e 3	Sem reforço	-	15	15	50			
RC	4, 5, 6, 7 e 8	Carbono	CSCC						
RR	9, 10, 11, 12 e 13	Rami							
RS	14, 15, 16, 17 e 18	Sisal							
RCE	19 e 20	Carbono	CEC						
RRE	21 e 22	Rami							
RSE	23 e 24	Sisal							

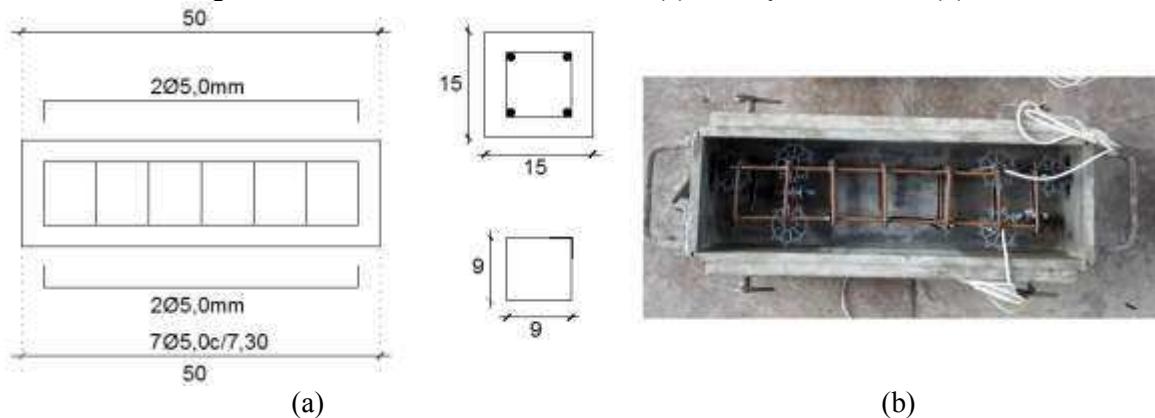
Fonte: AUTOR.

3.5.1 PRODUÇÃO DAS VIGAS

3.5.1.1 AÇO

As vigas foram dimensionadas para que tivessem ruptura por flexão, com deformação plástica excessiva da armadura. Foram adotadas barras de 5,0 mm de diâmetro para armadura longitudinal, correspondendo a uma taxa de armadura de $\rho=0,17\%$. A armadura transversal foi constituída por barras de aço de 5,0 mm de diâmetro a cada 7,30 cm de espaçamento, e foi dimensionada para evitar ruptura da viga por cisalhamento. O cobrimento nominal especificado foi 3 cm de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, e obtido com a utilização de espaçadores plásticos. A Figura 62 apresenta o detalhamento da armadura e locação em fôrma.

Figura 62 – Detalhamento da armadura (a) e locação em fôrma (b)



Fonte: AUTOR.

As armaduras longitudinais de flexão receberam lixamento na parte central inferior, com o propósito de remover as mossas e posteriormente acertar a superfície para colagem dos extensômetros (Figura 63). Esta operação foi feita com o uso de materiais e ferramentas como lixas, limas finas e esmeril. Em seguida foi feita a limpeza da superfície com acetona,

para evitar a contaminação do local de colagem como óleos, graxas, óxidos, poeiras e outros agentes prejudiciais.

Figura 63 – Lixamento das armaduras longitudinais de tração.



Fonte: AUTOR

3.5.1.2 *FÓRMAS*

As vigas foram moldadas em fôrmas metálicas e de madeira, nas dimensões de projeto. As de madeira foram elaboradas com painéis de madeira compensada resinada, tomando o cuidado com a capacidade de suporte e de deformações utilizando travamentos. Previamente à etapa de concretagem foram feitas verificação de estanqueidade, posteriormente as fôrmas foram limpas, receberam aplicação de uma fina camada de óleo e finalmente foi colocada a armadura. A Figura 64 apresenta as fôrmas preparadas para receber o concreto.

Figura 64 – Fôrmas utilizadas para confecção das vigas.



Fonte: AUTOR.

Previamente à etapa de locação das armaduras, foi pregada no fundo de seis fôrmas uma ripa de madeira, nas dimensões de 50 mm x 400 mm x 7 mm, de tal modo que no momento de desforma facilite a produção dos entalhes na região central da viga, evitando a quebra do concreto (Figura 65). Estes entalhes foram previamente preparados para a posterior inserção e colagem dos compósitos de reforço.

Figura 65 – Produção dos entalhes no cobrimento do concreto.



a) Disposição da ripa dentro da fôrma

b) Após desforma

Fonte: AUTOR.

3.5.1.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Neste trabalho adotou-se como critério de dosagem do concreto o método IPT/USP. Após a realização da caracterização dos materiais, procedeu-se o ajuste do traço. Os materiais utilizados foram secos ao ar e peneirados, além de estarem livres de matéria orgânica e impurezas.

3.5.1.4 AGREGADO MIÚDO

Foram produzidas três misturas de concreto, utilizando como agregado miúdo a areia lavada fina e média de rio da região do triângulo mineiro. As características destes agregados estão apresentadas na Tabela 21 e Tabela 22, e a Figura 66 e Figura 67 apresentam suas curvas granulométricas.

Tabela 21 – Caracterização da areia fina.

Agregado miúdo									Método de ensaio
Abertura da peneira	12,5	9,5	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	< 0,6	NBR NM 248:2003
% Retida média	0,18	0,16	0,29	0,18	0,65	1,57	6,29	90,68	
% Retida acumulada	0,18	0,34	0,63	0,81	1,46	3,03	9,32	100	
Dimensões máxima característica (mm)									1,18
Módulo de finura									1,97
Massa específica (g/cm ³)									2,68
Granulometria									Areia fina

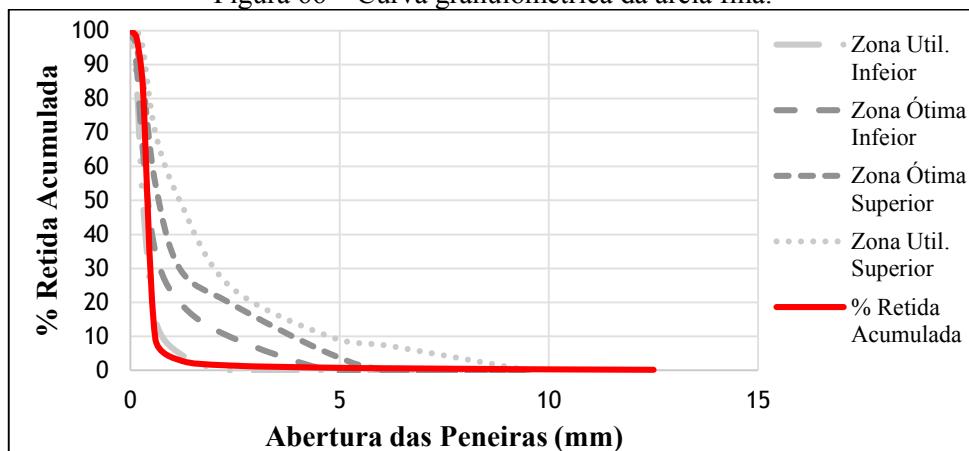
Fonte: AUTOR.

Tabela 22 – Caracterização da areia média.

Agregado miúdo									Método de ensaio
Abertura da peneira	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0	NBR NM 248:2003
% Retida média	0,10	0,03	5,05	15,09	34,16	32,93	10,86	1,78	
% Retida acumulada	0,10	0,13	5,18	20,27	54,43	87,36	98,22	100	
Dimensões máxima característica (mm)									4,75
Módulo de finura									2,66
Massa específica (g/cm ³)									2,67
Granulometria									Areia média

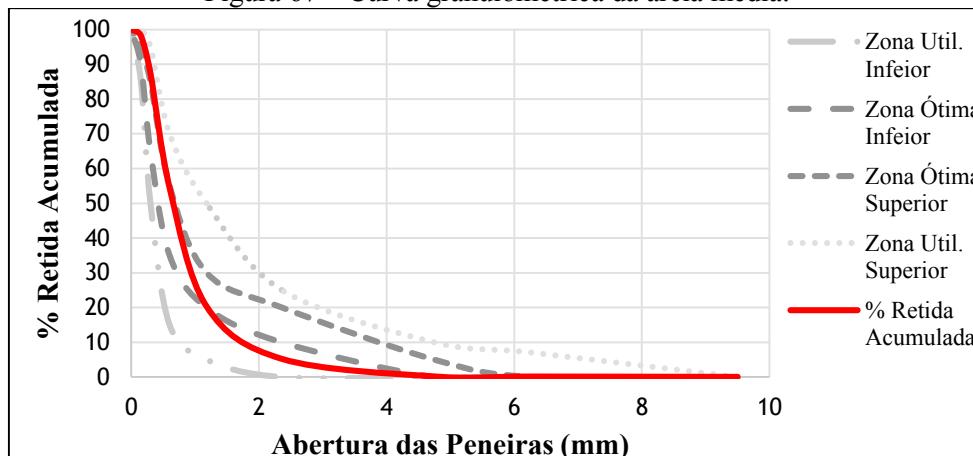
Fonte: AUTOR.

Figura 66 – Curva granulométrica da areia fina.



Fonte: AUTOR.

Figura 67 – Curva granulométrica da areia média.



Fonte: AUTOR.

3.5.1.5 AGREGADO GRAÚDO

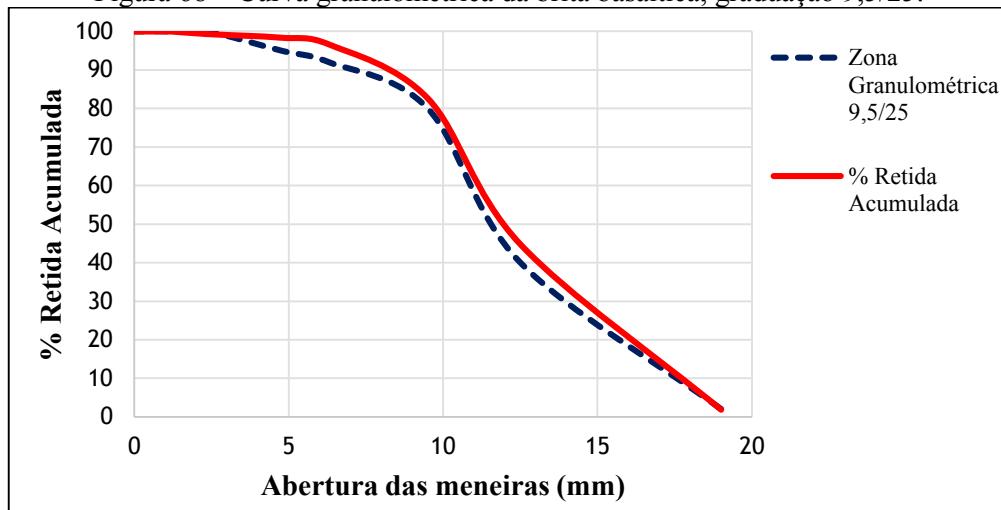
Na produção do concreto foi utilizada como agregado graúdo a pedra britada basáltica, com graduação 9,5/25, cujas características estão apresentadas na Tabela 23. A Figura 68 apresenta sua curva granulométrica.

Tabela 23 – Caracterização da brita basáltica, graduação 9,5/25.

Agregado graúdo								Método de ensaio
Abertura da peneira	19,0	12,5	9,50	6,30	4,75	2,36	1,18	< 1,18
% Retida média	1,88	42,92	37,87	13,99	1,73	0,94	0,67	0
% Retida acumulada	1,88	44,80	82,67	96,66	98,39	99,33	100	100
Dimensões máximas características (mm)								19,0
Módulo de finura								6,82
Massa específica (g/cm ³)								2,88
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)								1,57
Granulometria								Brita 1

Fonte: AUTOR.

Figura 68 – Curva granulométrica da brita basáltica, graduação 9,5/25.



Fonte: AUTOR.

3.5.1.6 CIMENTO PORTLAND CP IV - 32

Foi utilizado na mistura do concreto como aglomerante, o cimento CP IV – 32, para produzir as vigas prismáticas. Este cimento foi escolhido por ser um tipo comumente disponível e usado no mercado atualmente. A Tabela 24 apresenta suas características físicas.

Tabela 24 – Caracterização física do cimento CP IV 32 RS.

Propriedades físicas	Cimento CP IV - 32	Norma
Massa específica (g/cm ³)	2,94	NBR NM 23:2000
Finura	Área específica (m ² /kg ⁻¹)	NBR 16372:2015
Tempo de pega (min)	Início de pega	NBR NM 65:2003
	Fim de pega	NBR NM 65:2003
Resistência à compressão (Mpa)	28 dias	NBR 7215:1997

Fonte: AUTOR.

3.5.1.7 PRODUÇÃO DO CONCRETO

Após o ajuste do traço, procedeu-se com a produção do concreto em laboratório, misturando os materiais mecanicamente em uma betoneira com capacidade de 320 litros. O traço utilizado para confecção do concreto foi para obter resistência à compressão média de 25 MPa aos 28 dias, tendo como proporção em massa seca 1:2,3:3:0,48 e um consumo de cimento de 367,21 Kg/m³. Foi utilizado 0,8% (em relação à massa de cimento) de aditivo superplasticificante para obter abatimento de 170 mm. A Tabela 25 apresenta os materiais utilizados para produzir 1m³ de concreto.

Tabela 25 – Materiais utilizados para 1m³ de concreto.

Material	Características	Consumo por m ³ de concreto
Agglomerante	Cimento CP-IV 32	367,21 Kg
Agregados	Areia natural lavada média 70%	591,21 Kg
	Areia natural lavada fina 30%	253,38 Kg
	Basalto britado-Graduação 9,5/25	1101,63 Kg
Superplasticificante	MasterGlenium 3400	2,94 Kg
Água	Rede pública de abastecimento (tratada)	176,26 L
Resistência à compressão	25 Mpa	

Fonte: AUTOR.

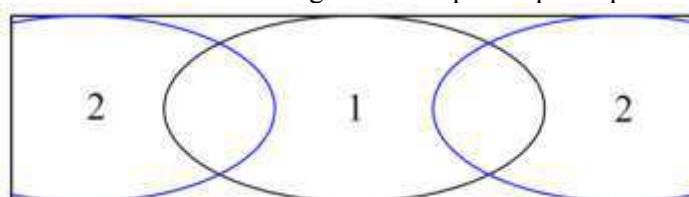
Além das vigas foram moldadas também corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm x 20 cm, para os ensaios de determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto para as idades de 28 dias e na data do ensaio das vigas.

Os materiais foram pesados com a devida correção, por conta da umidade dos agregados. Foram adicionados à betoneira, na sequência, agregado graúdo, cimento e aproximadamente 30% da água de amassamento. Em seguida, estes materiais foram misturados por 2 minutos, e posteriormente acrescentado agregado miúdo e o restante de água misturada ao aditivo. Após a mistura, uma pequena quantidade de concreto foi retirada da betoneira para realização do ensaio de abatimento do tronco de cone, de acordo com os procedimentos da ABNT NBR NM 67:1998. A partir da realização do ensaio, foi obtido um abatimento de tronco de cone de 175 mm.

3.5.1.8 MOLDAGEM

Os procedimentos de moldagem, transporte, desforma e cura seguiram as especificações da ABNT NBR 5738:2015, utilizando adensamento manual para os corpos de prova e mecânico, com vibrador de imersão para as vigas, tendo a agulha 420 mm de comprimento e diâmetro de 25,4 mm. A moldagem das vigas foi iniciada no terço médio (área 1) e, em seguida, foram preenchidos os outros terços (área 2), conforme apresentado na Figura 69. A Figura 70 ilustra o procedimento de moldagem das vigas.

Figura 69 – Método de moldagem dos corpos de prova prismáticos.



Fonte: EN 14651 (2007)

Figura 70 – Moldagem das vigas prismáticas.



Fonte: AUTOR.

3.5.1.9 RETIRADA DAS FÓRMAS E CURA

A cura do concreto foi realizada mantendo os corpos de prova em câmara úmida por 24 horas, para os moldes cilíndricos, e 48 horas para os prismáticos, quando foi feita a desmoldagem. Após a desforma, todos os corpos de prova foram curados submersos em água por 28 dias, e após o procedimento, ficaram em ambiente de laboratório até a data dos ensaios das vigas. A Figura 71 apresenta a cura dos corpos de prova imersos em água.

Figura 71 – Corpos de prova de concreto imersos em tanques com água.



a) Corpos de prova prismáticos

b) Corpos de prova cilíndricos

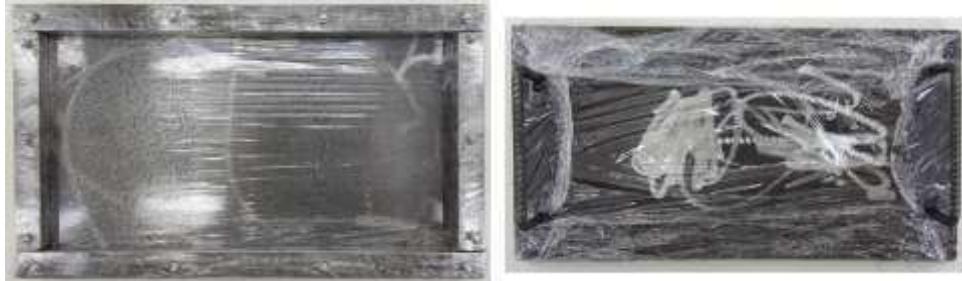
Fonte: AUTOR.

3.5.2 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS VEGETAIS PARA REFORÇO

Os compósitos foram produzidos com tecidos de rami e fibras de sisal, com teor de 70% em volume de fibras, para posteriormente reforçar vigas de concreto armado. Em ensaios realizados anteriormente (Fase 1), observou-se que, esses compósitos apresentaram melhores resultados como desempenho mecânico. Os reforços foram produzidos na mesma metodologia descrita no item 3.2, porém agora os PRFVeg apresentaram dimensões maiores,

tendo 20,5 cm de largura e 40,5 cm de comprimento. A espessura dos compósitos foi determinada segundo simulações realizadas no programa ANSYS®, conforme explicado no item 3.4, adotando-se uma espessura de 0,55 cm para todos os reforços vegetais, obtendo volume total de 456,64 cm³. A Figura 72 apresenta a fôrma metálica usada na moldagem dos compósitos para reforço das vigas.

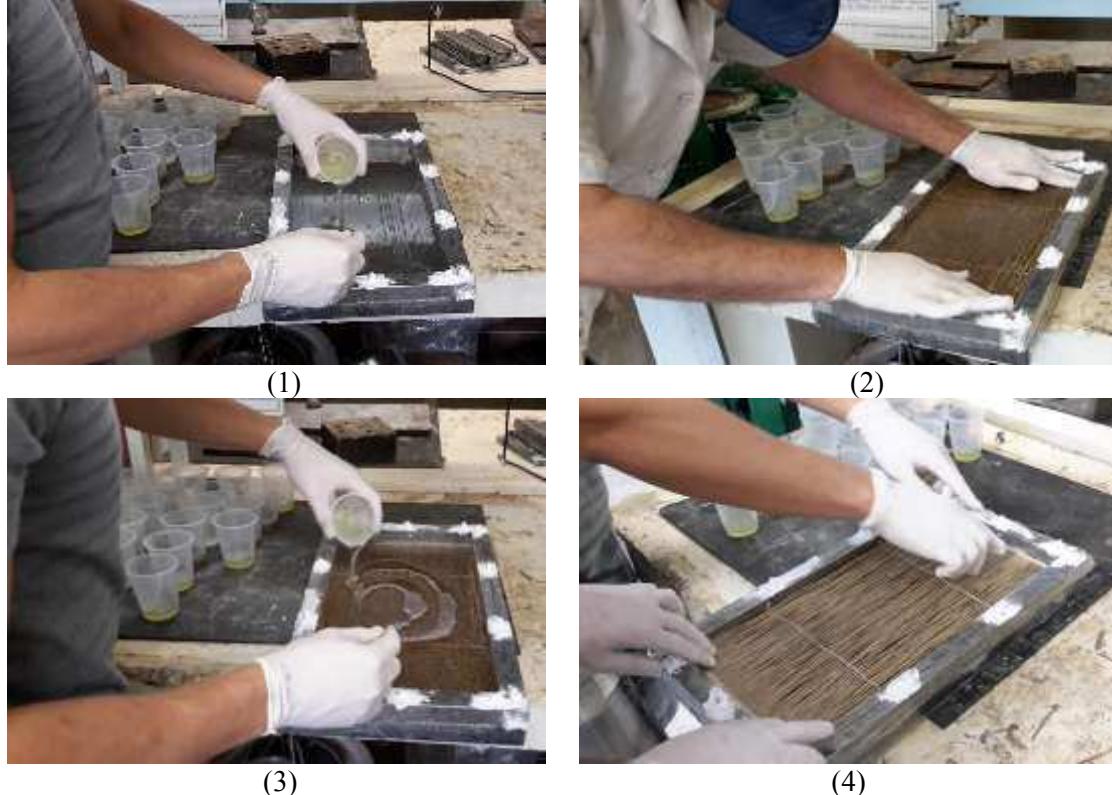
Figura 72 – Fôrma metálica para produção dos PRFVeg com comprimento de 40,5 cm.



Fonte: AUTOR.

Os compósitos foram produzidos por moldagem à compressão em temperatura ambiente, utilizando prensa hidráulica de forma idêntica à descrita no item 3.3.3 e ilustrada na Figura 73 e Figura 74.

Figura 73 – Etapas da preparação dos compósitos reforçados com tecidos de rami para reforço.





Fonte: AUTOR.

Figura 74 – Etapas da preparação dos compósitos reforçados com fibras de sisal para reforço.



Fonte: AUTOR.

Após a desforma, foram cortados 16 corpos de prova nas dimensões de 5 cm x 40 cm, no sentido da orientação das fibras de cada amostra, em uma máquina de serra de fita vertical da marca RMF. A Figura 75 apresenta o procedimento de corte dos compósitos para aplicação como reforço em vigas de concreto armado.

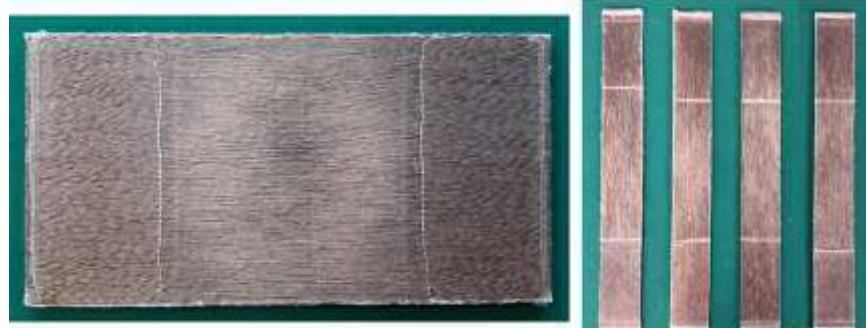
Figura 75 – Corte dos PRFVeg para reforço.



Fonte: AUTOR.

Foram produzidas 4 placas de PRFVeg, sendo 2 para fibras de sisal e 2 para tecido de rami. De cada placa foram cortadas 4 amostras. A Figura 76 e Figura 77 apresentam os PRFVeg produzidos.

Figura 76 – Polímero reforçado com fios de rami (PRFR) para reforço.

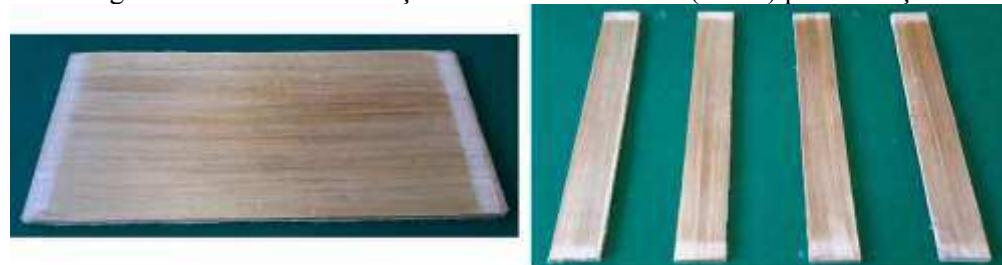


a) Placa moldada

b) Corpos de prova

Fonte: AUTOR.

Figura 77 – Polímero reforçado com fibras de sisal (PRFS) para reforço.



a) Placa moldada

b) Corpos de prova

Fonte: AUTOR.

Em seguida, os corpos de prova foram lixados, limpos e medidos. A Tabela 26, Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29 apresentam as dimensões obtidas, em milímetros, dos corpos de prova para reforço.

Tabela 26 – Dimensões das amostras da primeira placa moldada de PRFR para reforço.

Amostra	Esp. Esquerda	Esp. Meio	Esp. Direita	Média	Larg. Esquerda	Larg. Meio	Larg. Direita	Média
1	5,47	5,48	5,44	5,46	50,70	49,18	49,31	49,73
2	5,40	4,96	5,36	5,24	49,34	48,73	49,00	49,02
3	5,44	4,97	5,40	5,27	49,78	50,80	49,85	50,14
4	5,48	5,31	5,46	5,42	50,72	51,19	50,98	50,96
				5,35				49,97

Fonte: AUTOR.

Tabela 27 – Dimensões das amostras da segunda placa moldada de PRFR para reforço.

Amostra	Esp. Esquerda	Esp. Meio	Esp. Direita	Média	Larg. Esquerda	Larg. Meio	Larg. Direita	Média
1	5,65	5,16	5,58	5,46	50,27	49,16	50,8	50,08
2	5,65	5,19	5,51	5,45	49,89	50,00	49,33	49,74
3	5,98	5,65	6,27	5,97	47,91	48,95	48,77	48,54
4	5,52	5,46	5,52	5,50	50,00	50,29	50,18	50,16
				5,60				49,63

Fonte: AUTOR.

Tabela 28 – Dimensões das amostras da primeira placa moldada de PRFS para reforço.

Amostra	Esp. Esquerda	Esp. Meio	Esp. Direita	Média	Larg. Esquerda	Larg. Meio	Larg. Direita	Média
1	5,7	5,5	5,75	5,65	48,91	49,37	48,94	49,07
2	5,64	5,27	5,64	5,52	49,45	50,07	50,95	50,16
3	5,80	5,45	5,66	5,64	50,24	49,65	49,16	49,68
4	5,80	5,46	5,80	5,69	50,73	50,51	50,27	50,50
				5,62				49,85

Fonte: AUTOR.

Tabela 29 – Dimensões das amostras da segunda placa moldada de PRFS para reforço.

Amostra	Esp. Esquerda	Esp. Meio	Esp. Direita	Média	Larg. Esquerda	Larg. Meio	Larg. Direita	Média
1	5,60	5,35	5,62	5,52	52,05	50,17	51,20	51,14
2	5,85	5,60	5,81	5,75	50,93	50,93	50,95	50,94
3	6,22	5,96	6,18	6,12	50,26	50,88	50,12	50,42
4	5,40	5,25	5,48	5,38	50,11	51,76	50,97	50,95
				5,69				50,86

Fonte: AUTOR.

A Figura 78 e Figura 79 apresentam os reforços com fibras vegetais, prontos para colagem.

Figura 78 – PRFR pronto para colagem nas vigas.



Fonte: AUTOR.

Figura 79 – PRFS pronto para colagem nas vigas.



Fonte: AUTOR.

3.5.3 COMPOSTO DE PRFC

Os laminados de fibras de carbono utilizados para reforço foram cortados nas dimensões de projeto, e posteriormente, realizadas a limpeza das amostras com estopa embebida em acetona. Foi feita a aeração da superfície, removendo poeiras e partículas para então ser realizada a colagem do reforço nas vigas. A Figura 80 apresentam os laminados prontos para colagem.

Figura 80– Laminados de fibras de carbono.



Fonte: AUTOR.

3.5.4 ADESIVO EPÓXI

Na colagem do reforço de PRFC e PRFVeg, foi utilizado um adesivo à base de resina epóxi, misturado na proporção de três partes da formulação epóxi para uma parte de catalizador. O produto utilizado é da marca Viapol, conforme apresentado na Figura 81.

Figura 81 – Recipiente do adesivo epóxi e catalizador.



Fonte: AUTOR.

Para verificar as propriedades mecânicas deste material, foram moldados três corpos de prova cilíndricos, nas dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para realização de ensaio à compressão e comparar estes valores com os que foram informados pelo fabricante. As características deste adesivo epóxi, que foram obtidas do rótulo do produto, estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Características técnicas do adesivo epóxi.

Propriedades	Valores
Massa Específica	1,90 Kg/dm ³
Tempo para aplicação	60 a 120 minutos
Cura inicial	24 horas
Cura final	7 dias
Resistência à compressão à 1 dias	30 MPa
Resistência à compressão à 7 dias	70 MPa
Temperatura de aplicação	5 a 35 °C

Fonte: AUTOR.

3.5.5 APLICAÇÃO DO REFORÇO NA VIGA

Para obter uma aderência satisfatória entre o reforço e o substrato do concreto, foi realizado o tratamento da superfície de ligação, para obter a perfeita transferência de esforços entre concreto e o PRFC. Para isso, o método de preparo da superfície das vigas e colagem do reforço foi de acordo com os procedimentos adotados por vários pesquisadores e fabricantes dos produtos.

Iniciou-se o tratamento da superfície do concreto, retirando toda a camada frágil da nata de cimento, através de um lixamento mecânico, com rebolo para desbaste de concreto, acoplada a uma esmerilhadeira elétrica, até que os agregados graúdos ficassesem expostos e toda extensão da viga ficasse nívelada. Terminado este procedimento, foi feita a remoção de poeiras e partículas soltas, com jato de ar comprimido. A Figura 82 apresenta o procedimento de preparação da superfície do concreto.

Figura 82 – Preparação da superfície da viga, com rebolo para desbaste de concreto, acoplado a uma esmerilhadeira.



Fonte: AUTOR.

Uma vez concluída a etapa de preparação da superfície de concreto, procedeu-se com a demarcação da área onde seria aplicado o reforço e também a demarcação da área onde seria apoiada a viga, para facilitar o alinhamento e posicionamento da viga sobre a base da máquina de ensaio. Posteriormente, colou-se fita adesiva no substrato do concreto, para delimitar o espaço no qual seria colado o reforço, sendo um retângulo de 40 cm x 5 cm, promovendo uma padronização dos corpos de prova (Figura 83).

Figura 83 – Demarcação da área para reforço.



Fonte: AUTOR.

Em sequência, misturou-se separadamente os componentes A e B, e, em seguida, verteu-se todo o conteúdo do componente B (catalizador) no recipiente do componente A (resina), procedendo a mistura mecânica com uma haste metálica acoplada a um dispositivo giratório

por 3 minutos, até obter um material homogêneo sem grumos. A Figura 84 apresenta o procedimento da preparação da resina epóxi do tipo bi-componente.

Figura 84 – Preparação da resina epóxi.



Fonte: AUTOR.

Após a mistura, uma fina camada de adesivo epóxi foi aplicada no concreto, utilizando-se espátulas metálicas, com abertura de 2 mm x 50 mm, para a distribuição na superfície da viga, formando uma camada uniforme entre 1,0 mm e 2,0 mm de espessura e 50 mm de largura, ao longo de toda a extensão da viga. Durante a aplicação do adesivo epóxi sobre a superfície do concreto, tomou-se o cuidado de observar a eficiência da penetração e completa cobertura da superfície. Sobre o laminado, também aplicou-se uma camada de resina, com uma espessura levemente superior ao longo da linha central do laminado. Este procedimento foi adotado para a redução do risco da formação de vazios no momento em que o laminado for aplicado sobre a superfície de concreto. Em seguida, o reforço foi instalado após a regularização da camada do adesivo, pressionando-se com a mão o reforço contra a resina para a saída do ar no momento da colagem. Esta pressão deve ser aplicada do centro para as extremidades, para garantir que não haja a formação de vazios. O adesivo excedente era espalhado pelas laterais, fazendo-se um acabamento chanfrado. Este procedimento ocorreu em temperatura ambiente e está ilustrado na Figura 85.

Figura 85 – Aplicação do reforço à viga.



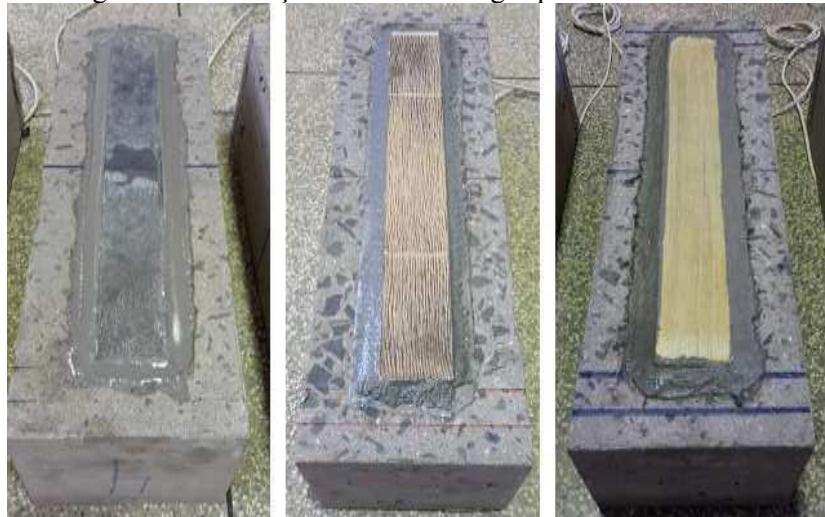
(a) Aplicação da resina epóxi

(b) Instalação do reforço

Fonte: AUTOR.

Como verificado no capítulo anterior, pesquisas mostraram que o PRF colado em entalhe na camada de cobrimento, apresentou melhor desempenho mecânico do que a colagem dos compósitos na superfície do concreto. Na busca de encontrar a melhor técnica de ancoragem para evitar o desprendimento do PRF na estrutura e aumentar sua capacidade carga, foram avaliados dois métodos construtivos. Um dos métodos teve o reforço colado sobre a superfície do concreto, na parte tracionada da viga, e feito um acabamento chanfrado nas laterais (CSCC) (Figura 86). No outro método foi feito um entalhe na camada de cobrimento de concreto (CEC), sendo uma faixa de 50 mm de largura por 400 mm de comprimento, e posteriormente realizou a colagem do PRF, na direção de sua largura, o qual está apresentado na Figura 87.

Figura 86 – Reforços colados nas vigas pelo método CSCC.



Fonte: AUTOR.

Figura 87 – Reforços colados nas vigas pelo método CEC.



Fonte: AUTOR.

3.5.6 INSTRUMENTAÇÃO

Os resultados de uma análise experimental estão associados à quantidade de informações adquiridas durante o ensaio para a compreensão do comportamento do elemento estrutural sob análise.

Dentro desta perspectiva, foram medidas as deformações na armadura, através de extensômetros elétricos da marca Excel PA-06-125BA-120-L, com resistência de $120\ \Omega$. Estes extensômetros elétricos foram soldados na armadura longitudinal tracionada, na região central, por meio de cola instantânea (Figura 88), isolados e impermeabilizados com fita isolante plástica e silicone.

Figura 88 – Extensômetros soldados na armadura.

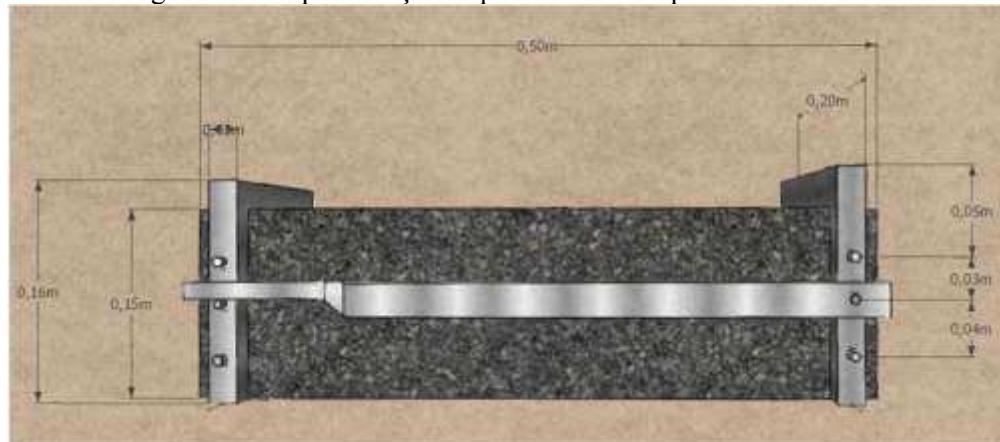


Fonte: AUTOR.

Na ligação de cada par de extensômetros, foram utilizados compensadores de temperatura, com o objetivo de anular a variação nos extensômetros com relação a temperatura ambiente, sofridas pelos corpos de prova.

Para o controle de deflexão das vigas prismáticas, foram utilizados transdutores do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), com deslocamento de 10 mm e sensibilidade de 0,0001 mm, acoplado a um dispositivo “YOKÉ” posicionado à meia altura da face lateral da viga. Este acessório pode ser aplicado em vigas prismáticas no ensaio de tração na flexão ou no ensaio de tenacidade à flexão. A Figura 89 mostra a representação esquemática dos detalhes dos suportes do dispositivo “YOKÉ”.

Figura 89 – Representação esquemática do dispositivo “YOKÉ”.



Fonte: AUTOR.

Durante a realização dos ensaios, a coleta de dados de força foi registrada através do sistema de aquisição de dados da própria Instron, com célula de carga de 100 kN, e para o monitoramento de deflexão e deformações específicas nas armaduras, os dados foram registrados por meio de um sistema de aquisição, utilizando um equipamento da HBM, conectados ao notebook, conforme apresentado na Figura 90.

Figura 90 – Sistema para aquisição de dados.



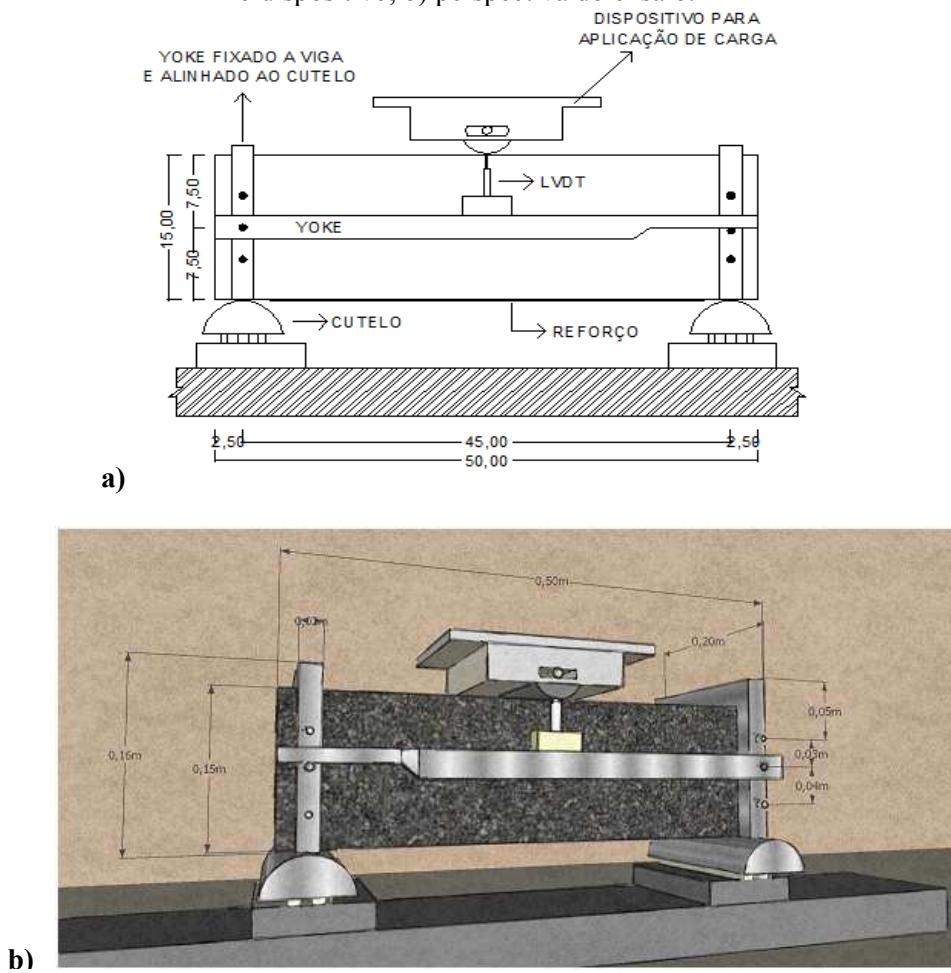
Fonte: AUTOR.

3.5.7 ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS

Para avaliar o desempenho dos compósitos como reforço, foram realizados ensaios de flexão nas vigas (15 cm x 15 cm x 50 cm), seguindo-se as recomendações descritas pela ABNT NBR 12142:2010. A força foi aplicada de forma gradual e uniforme, evitando choques, de forma que o aumento da tensão sobre as vigas ficou compreendido no intervalo de 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min. O ensaio foi do tipo três pontos (*three Point bend*). O padrão do

ensaio está representado na Figura 91. Os apoios inferiores foram incorporados de articulações, e o elemento articulado para aplicação da força foi acoplado à rótula da máquina de ensaio.

Figura 91 – Esquema de ensaio à flexão das vigas: a) detalhamento do posicionamento da viga no dispositivo, b) perspectiva do ensaio.



Fonte: AUTOR.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

4.1 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES: FASE – 1

As análises realizadas neste tópico referem-se à caracterização dos laminados de carbono e compósitos de fibras vegetais com diversos teores de fibras, com o objetivo de selecionar os compósitos vegetais com melhores propriedades mecânicas, para posteriormente aplicá-las como reforço em vigas de concreto armado.

4.1.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE PRFC

Nessa sessão são apresentados os resultados dos compósitos de carbono e comparados os valores com os declarados pelo fabricante. Na Tabela 31 são apresentados todos os valores encontrados nos ensaios de tração dos laminados de carbono: tensão máxima, deformação e módulo de elasticidade.

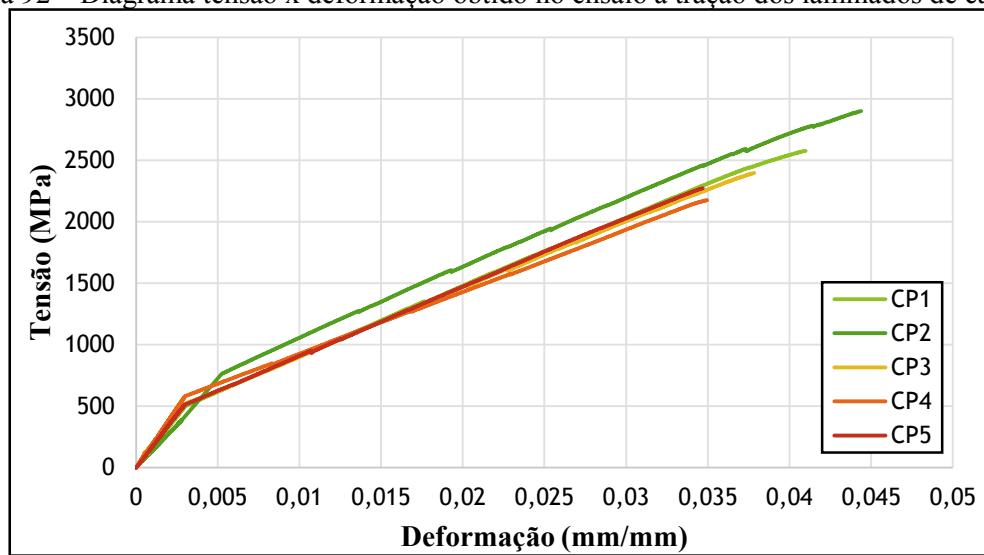
Tabela 31 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração do PRFC.

CP	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação máxima (%)
1	166,14	2576,25	4,09
2	137,89	2900,45	4,44
3	163,52	2397,16	3,78
4	193,94	2175,96	3,49
5	172,59	2272,58	3,47
Média	166,82	2464,48	3,85
Coeficiente de variação	12,05	11,6	10,72
Desvio padrão	20,11	285,99	0,41

Fonte: AUTOR.

Na Figura 92 é mostrado o comportamento linear do laminado até a ruptura.

Figura 92 – Diagrama tensão x deformação obtido no ensaio à tração dos laminados de carbono.



Fonte: AUTOR.

Comparando os valores do fabricante com os do presente ensaio, percebe-se uma variação significativa para resistência à tração e deformação. Já os valores para módulo de elasticidade foram muito próximos (Tabela 32).

Tabela 32 – Comparaçao das propriedades mecânicas do presente ensaio e fabricante do PRFC.

Origem dos dados	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (mm/mm)
Fabricante	3100,00	165,00	0,0170
Ensaio	2464,48	166,82	0,0385

Fonte: AUTOR.

4.1.2 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRAS NOS COMPÓSITOS VEGETAIS

Após a desforma dos compósitos, verificou-se a massa e dimensões de cada amostra (largura, comprimento e espessura), para calcular a quantidade real de resina e fibras, conforme apresentados na Tabela 33, Tabela 34 e Tabela 35.

Os compósitos em estudo foram produzidos com teores acima de 50% de fibras até alcançar um empacotamento máximo de fibras em seções unitárias, respeitando o volume mínimo de resina necessária para a adesão entre as fibras. O objetivo do estudo é conhecer as propriedades mecânicas destes compósitos, tendo em vista que, estes materiais foram pouco estudados pela literatura, devido ao limite de processo de moldagem. Portanto, foram adotados teores nominais de 50%, 60% e 70% de fibras em volume.

Tabela 33 – Teores finais dos compósitos com fibras de sisal.

Compósito (%)	Espessura (cm)	Volume compósito (cm³)	Massa fibra seca (g)	Massa resina (g)	Teor ar incorporado (%)	Massa específica (g/cm³)	Teor de fibras em volume (%)
50	0,28	112,73	92,51	36,49	14,99	1,14	54%
60	0,29	115,93	110,54	37,46	7,34	1,28	63%
70	0,313	123,84	126,84	40,56	3,08	1,35	68%

Fonte: AUTOR.

Tabela 34 – Teores finais dos compósitos com tecidos de sisal.

Compósito (%)	Espessura (cm)	Volume compósito (cm³)	Massa fibra seca (g)	Massa resina (g)	Teor ar incorporado (%)	Massa específica (g/cm³)	Teor de fibras em volume (%)
50	0,32	128,32	103,29	45,51	13,61	1,16	53%
60	0,34	136,71	130,29	35,01	12,23	1,21	63%
70	0,32	127,52	130,47	32,33	8,45	1,28	68%

Fonte: AUTOR.

Tabela 35 – Teores finais dos compósitos com tecidos de rami.

Compósito (%)	Espessura (cm)	Volume compósito (cm³)	Massa fibra seca (g)	Massa resina (g)	Teor ar incorporado (%)	Massa específica (g/cm³)	Teor de fibras em volume (%)
50	0,27	108,73	93,62	47,38	6,59	1,30	54%
60	0,34	134,32	134,43	47,57	5,05	1,36	63%
70	0,31	121,92	137,67	36,83	2,14	1,43	71%

Fonte: AUTOR.

Observa-se que a medida que aumenta o teor de fibras nos compósitos, os valores da massa específica tendem a aumentar, convergindo para o valor da massa específica da fibra de reforço. Nota-se também que os valores de massa específica obtidos para os compósitos estudados são menores do que outros tipos de compósitos epóxi reforçados com as tradicionais fibras sintéticas, como apresentado na Tabela 36.

Tabela 36 – Massa específica dos compósitos de resina epóxi reforçadas com fibras sintéticas.

Material	Massa específica (g/cm³)
Epóxi	1,15
Epóxi/Vidro E	1,97
Epóxi/Aramidá	1,40
Epóxi/Carbono	1,60
Epóxi/Boro	2,00

Fonte: Adaptado de SOARES, 2012; LEITÃO, 2007.

4.1.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA RESINA EPÓXI

Os resultados obtidos na caracterização da resina epóxi estão apresentados na Tabela 37. Foi realizado um comparativo das propriedades mecânicas do presente trabalho com os valores mencionados pela literatura. Nota-se que os resultados obtidos foram superiores quando comparados aos de Soares (2012) e dentro da margem de valores conseguidos por Pereira *et. al.* (2015).

Tabela 37 – Propriedades mecânicas da resina epóxi.

Epóxi	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação Máxima (%)
Autor	3,93	35,04	4,54
Soares	3,10	23,20	0,80
Pereira <i>et al.</i>	3,0 - 6,0	28 - 100	1,0 - 6,0

Fonte: AUTOR.

4.1.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS VEGETAIS

O conhecimento das propriedades mecânicas é muito importante para uma determinada aplicação. Visto que são as propriedades mecânicas que definem o comportamento do material quando submetidos à esforços mecânicos, pois estas estão relacionadas à capacidade do material de resistir ou transmitir estes esforços aplicados sem romper e sem se deformar de forma incontrolável.

Os compósitos poliméricos com fibras/fios alinhados unidirecionalmente com as frações volumétricas produzidos neste trabalho, ainda não foram anteriormente estudados, com o objetivo de aplicação como reforço de estruturas. Os corpos de prova para cada teor de fibras dos compósitos reforçados com fibras de sisal, tecidos de sisal e tecidos de rami foram ensaiadas à tração até a ruptura e suas propriedades mecânicas estão apresentadas a seguir.

4.1.4.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE SISAL

A Tabela 38 apresenta os resultados obtidos para os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de sisal, nos teores de 0%, 50%, 60% e 70%, onde estão descritos os valores médios com respectivos desvios padrões para o módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação máxima na ruptura.

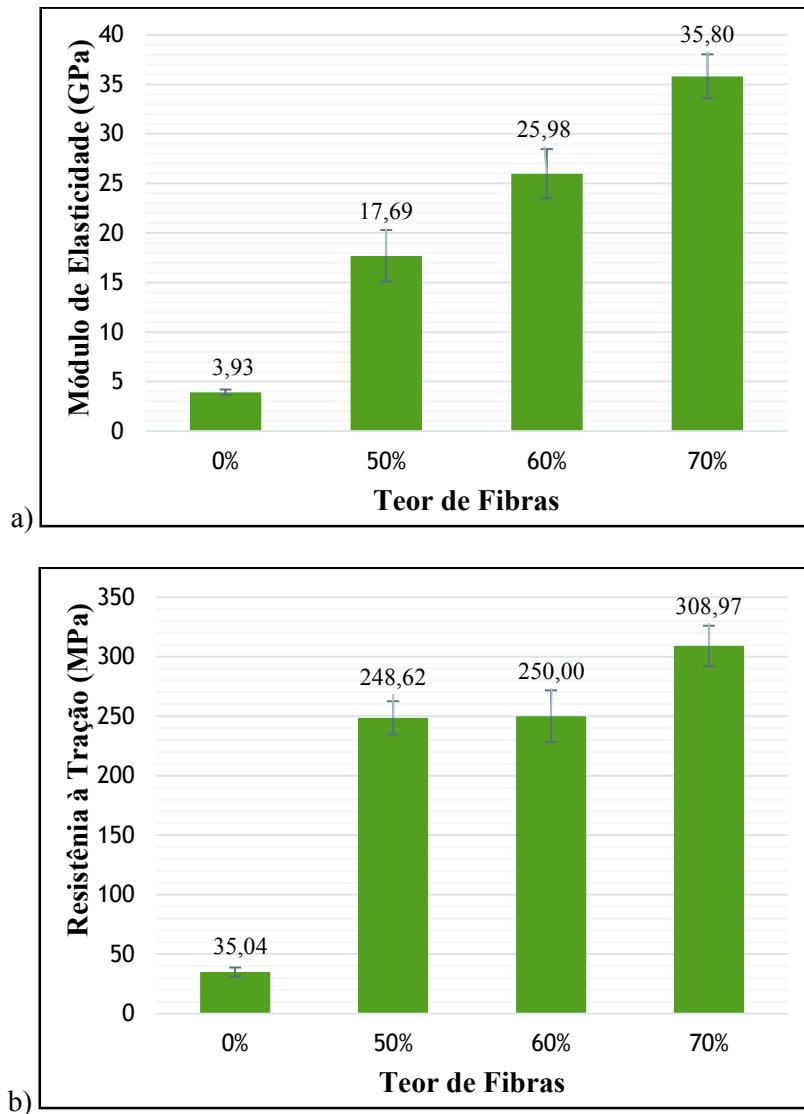
Tabela 38 – Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de sisal/epóxi.

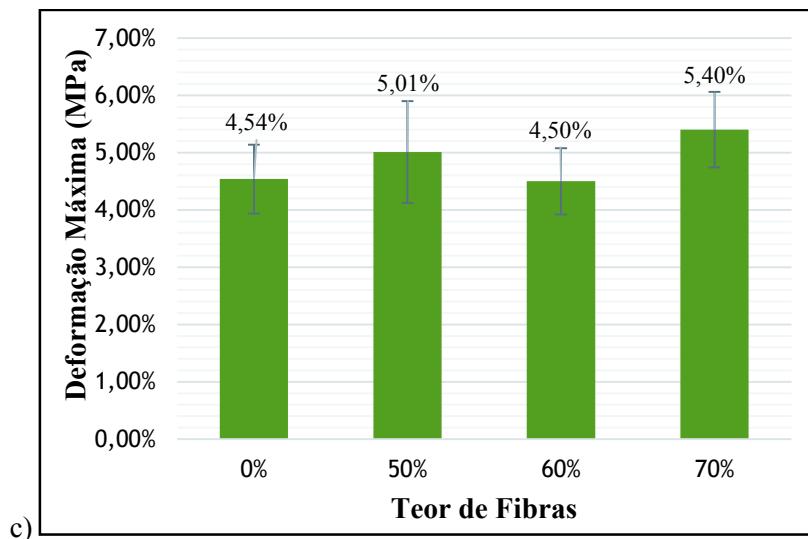
Teor de Fibras em Volume	Módulo de Elasticidade (GPa)		Resistência à Tração (MPa)		Deformação Máxima (%)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0%	3,93	0,27	35,04	3,70	5,54	0,6
50%	17,69	2,59	248,62	13,99	5,01	0,89
60%	25,98	2,49	250,00	21,81	4,50	0,58
70%	35,80	2,23	308,97	17,09	5,40	0,66

Fonte: AUTOR.

A partir dos dados da Tabela 38, foram feitos gráficos para comparar as propriedades mecânicas dos compósitos com diferentes frações de fibras, ilustrando claramente a evolução de suas propriedades mecânicas (Figura 93).

Figura 93 – Propriedades mecânicas dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal alinhadas unidirecionalmente: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação.





Fonte: AUTOR.

A partir da variação do teor de fibras de 0% até 70%, os resultados mostram que com a incorporação de fibras na matriz, houve um aumento expressivo em suas propriedades mecânicas, confirmando o que foi estudado na revisão bibliográfica. À medida que aumenta o teor de fibras, o comportamento do compósito se aproxima do comportamento das fibras, consequentemente, aumentando o módulo de elasticidade e resistência à tração. Em relação a resistência à tração, observa-se que quando variou o teor de fibras de 50% até 60%, não percebeu incremento significativo. Do compósito de 60% para 70%, houve aumento expressivo desta propriedade.

Entre os três percentuais de volume de fibras testados nos compósitos, os valores máximos para o módulo de elasticidade e resistência à tração foram obtidos para o teor de 70% em volume de fibras, apresentando valores de 35,80 GPa e 308,97 MPa, atingindo um aumento percentual de 811% no módulo de elasticidade e 782% para resistência à tração, em relação à matriz epóxi sem fibras, e de 350% no módulo de elasticidade e 610% para resistência à tração, em relação ao compósito com volume de 50% de fibras.

A deformação máxima na ruptura, com a incorporação de 50% em volume de fibras, obteve aumento de 10% em relação ao compósito sem fibras, permanecendo praticamente igual para 70% de fibras.

Comparando os resultados das propriedades mecânicas dos compósitos de sisal com os resultados de pesquisa semelhante realizada por Silva *et al.* (2015), os valores obtidos neste trabalho revelam um melhor desempenho. Os valores máximos encontrados pela autora citada para módulo de elasticidade e resistência à tração foram de 25,59 GPa e 181,20 MPa

respectivamente, obtidos para o teor de 70% em volume de fibras, sendo valores abaixo dos resultados obtidos neste trabalho com módulo de elasticidade de 35,80 GPa e resistência à tração de 308,97 MPa com teor de 70% de fibras. A melhora dos resultados ocorreu, principalmente, pelo fato do aperfeiçoamento no alinhamento das fibras e produção dos compósitos.

4.1.4.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM TECIDO DE SISAL

A Tabela 39 apresenta os valores médios com respectivos desvios padrões para o módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação máxima na ruptura para os compósitos de resina epóxi com teores de 0%, 50%, 60% e 70% em volume de tecido de sisal.

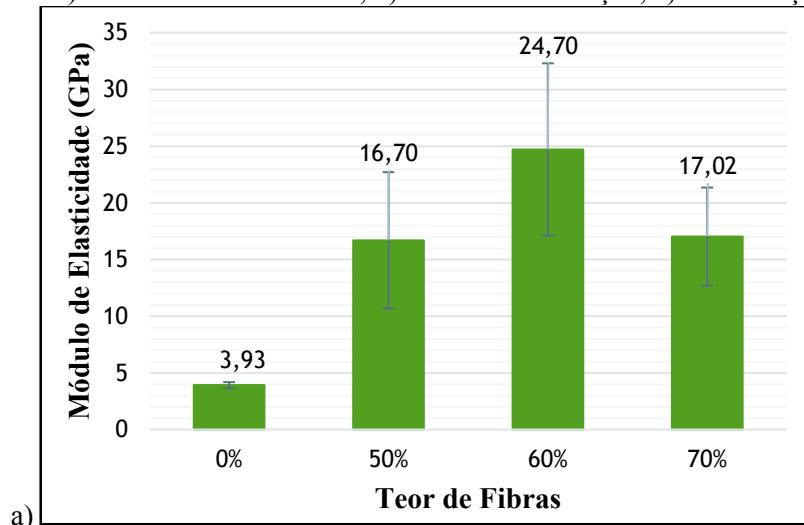
Tabela 39 – Propriedades mecânicas dos compósitos com tecidos de sisal/epóxi.

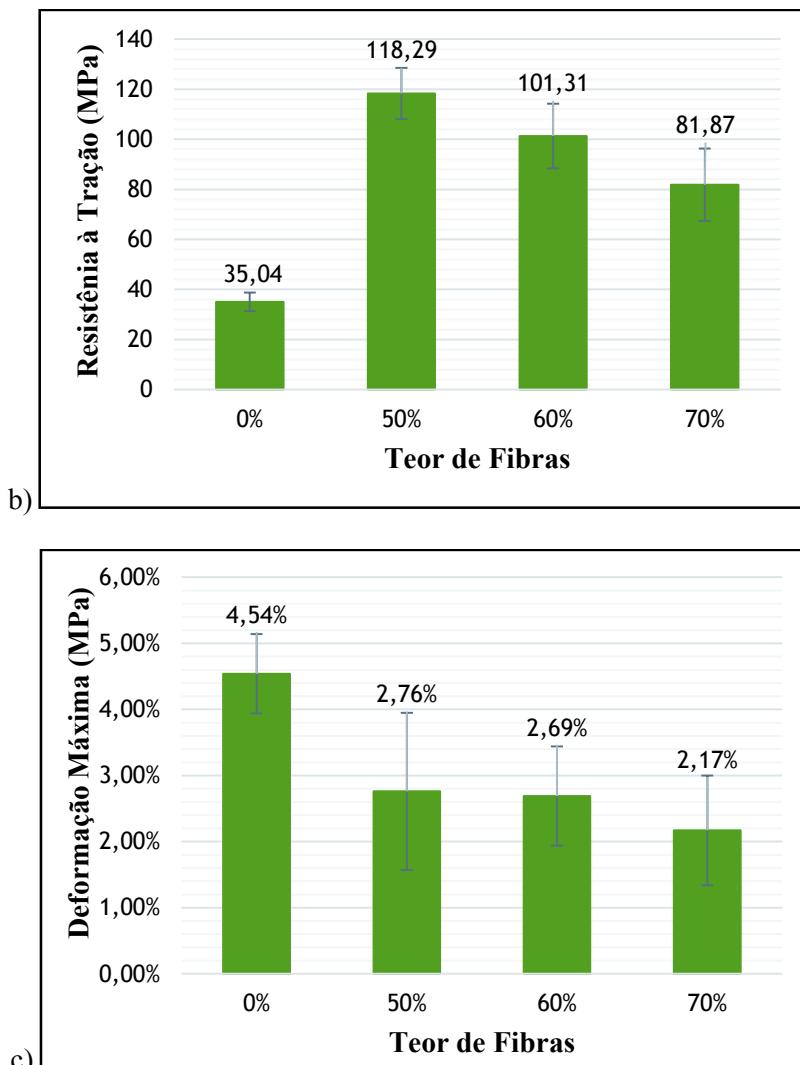
Teor de Fibras em Volume	Módulo de Elasticidade (GPa)		Resistência à Tração (MPa)		Deformação Máxima (%)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0%	3,93	0,27	35,04	3,70	5,54	0,6%
50%	16,70	6,01	118,29	10,20	2,76%	1,19%
60%	24,70	7,59	101,31	12,91	2,69%	0,75%
70%	17,02	4,33	81,87	14,39	2,17%	0,83%

Fonte: AUTOR.

A Figura 94 apresenta a evolução das propriedades mecânicas dos compósitos de fios de sisal/epóxi com diversos teores de fibras em volume.

Figura 94 – Propriedades mecânicas dos compósitos de resina epóxi reforçados com tecidos de sisal: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação.





Fonte: AUTOR.

Os resultados mostram que o módulo de elasticidade destes compósitos aumentaram com a incorporação de fibras na matriz até a fração de 60%, havendo uma redução de 31% para o teor de 70%. A melhora desta propriedade com o incremento do teor de tecidos de fios de sisal é expressiva até o teor de 60%, ou seja, o teor ótimo desse reforço estaria abaixo de 60%. As propriedades de resistência à tração aumenta do teor de 0% até 50%, havendo uma redução de 14,35% e 30,80% para os teores de 60% e 70%.

Portanto, o melhor valor do módulo de elasticidade obtido para estes compósitos foi para o teor de 60% em volume de fibras, com 24,70 GPa, tendo um aumento percentual de 528,50%, em relação a matriz sem fibras. Para resistência à tração foi obtido um valor de 118,29 MPa referente ao teor de 50% de fibras, tendo um aumento percentual de 238%, em relação a matriz sem fibras.

4.1.4.3 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM TECIDO DE RAMI

Os resultados obtidos dos compósitos de matriz epóxi reforçados com tecido de rami para os teores de 0%, 50%, 60% e 70%, estão apresentados na Tabela 40, onde estão descritos os valores médios com respectivos desvios padrões para o módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação máxima na ruptura.

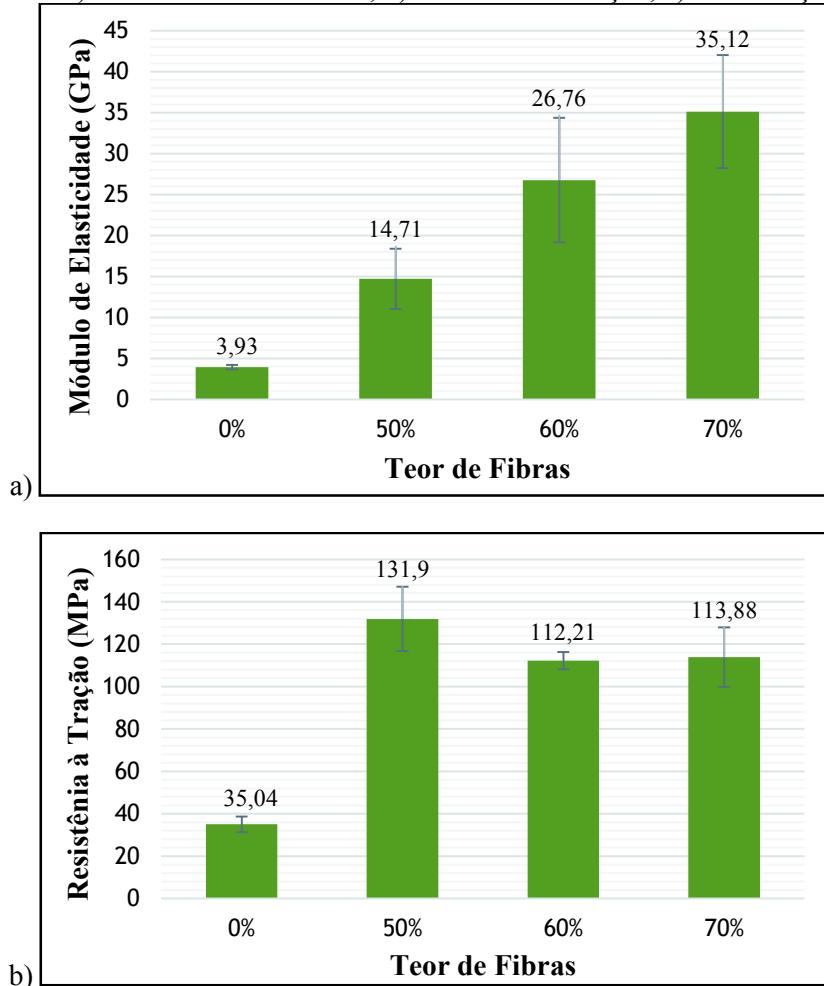
Tabela 40 – Propriedades mecânicas dos compósitos com fios de rami/epóxi.

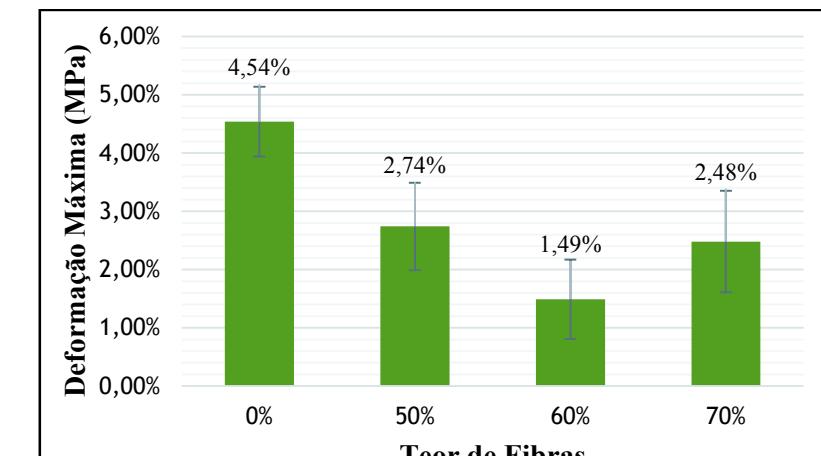
Teor de Fibras em Volume	Módulo de Elasticidade (GPa)		Resistência à Tração (MPa)		Deformação Máxima (%)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0%	3,93	0,27	35,04	3,70	4,54	0,6%
50%	14,71	3,68	131,9	15,15	2,74%	0,75%
60%	26,76	7,61	112,21	4,11	1,49%	0,68%
70%	35,12	6,90	113,88	14,10	2,48%	0,87%

Fonte: AUTOR.

A Figura 95 apresenta a variação das propriedades mecânicas com os diversos teores de fibras em volume.

Figura 95 – Propriedades mecânicas dos compósitos de resina epóxi reforçados com tecidos de rami: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação.





Fonte: AUTOR.

Os resultados mostram um aumento nas propriedades de módulo de elasticidade à medida que se aumenta a fração de fibras do compósito. Quando se variou o teor de fibras de 0% até 70%, houve um aumento percentual de 793,64%. Para as propriedades de resistência à tração, houve uma pequena redução dos valores dos compósitos de 50% para 60%, mantendo a mesma grandeza para o teor de 70% de fibras. Em relação a deformação máxima obtidas nos ensaios, houve uma diminuição considerável com a incorporação de fibras na matriz.

O compósito que apresentou melhor desempenho para módulo de elasticidade foi o teor de 70%, obtendo valor de 31,12 GPa, tendo aumento percentual de 139% em relação ao volume de 50% de fibras. Para resistência à tração foi obtido valor de 131,90 MPa, para o teor de 50% de fibras, apresentando aumento percentual de 277%, em relação a matriz sem fibras.

É importante observar que as propriedades mecânicas obtidas nesta pesquisa estão próximas dos valores apontados pela literatura. Paiva Jr. *et al.* (2004) produziu compósito com teor de 45% de fios de rami e 12% de fios de algodão, totalizando em 57% de fios no compósito, o qual resultou em 118 MPa de resistência à tração, sendo valor inferior comparado com compósito com 50% de fios de rami produzido neste trabalho (131,9 MPa).

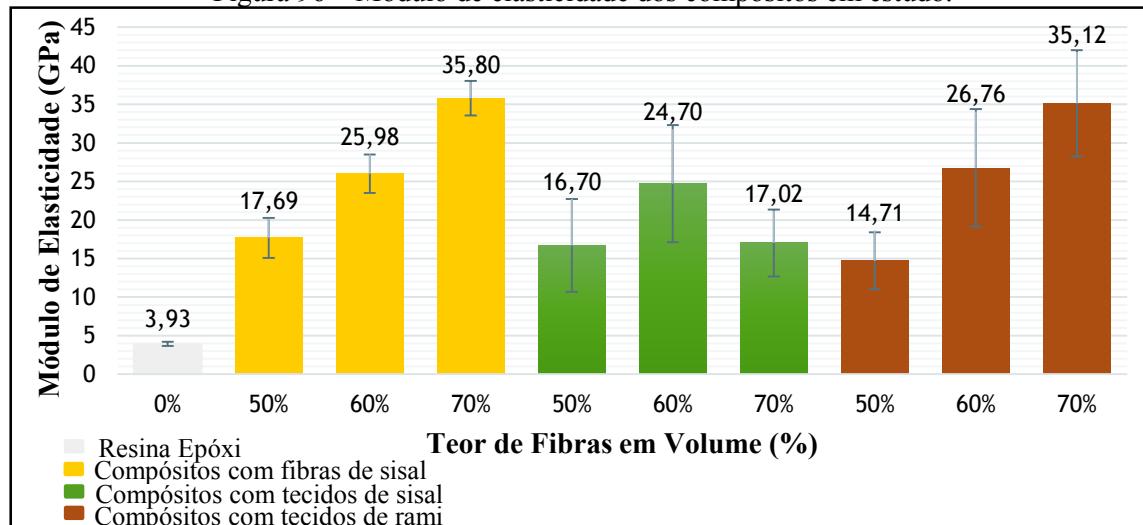
4.1.4.4 COMPARAÇÃO ENTRE COMPÓSITOS VEGETAIS

A Figura 96 apresenta os resultados para o módulo de elasticidade obtidos nos ensaios à tração dos diferentes compósitos. O aumento das propriedades mecânicas com o incremento do teor de fibras na matriz é satisfatório, com o crescimento do módulo de elasticidade. Nota-se que os três grupos com diferentes compósitos apresentam comportamento semelhantes com valores bem parecidos, exceto o compósito com teor de 70% de tecido de sisal, que não

houve um expressivo ganho no módulo, apresentado valor inferior comparados com os compósitos de tecidos de rami e fibras de sisal.

Comparando os diferentes compósitos com o mesmo volume de fibras e resina, nota-se que as fibras de sisal e fios de rami são muito mais finos que os fios de sisal tendo uma superfície específica muito maior, que envolvida pela matriz, garante a transferência de tensões entre elas. Já os fios de sisal têm diâmetros elevados com uma resistência muito alta, faltando resina e prejudicando sua aderência com a matriz. O fato do compósito com teor de 60% de tecidos de sisal ser melhor é explicado por apresentar maior volume de resina que envolve os fios de sisal garantindo a transferência destas tensões e, com o aumento do teor foi possível notar claramente após a ruptura dos corpos de prova que estavam faltando resina. Portanto, os compósitos reforçados com fibras de sisal e tecido de rami apresentaram melhores propriedades mecânicas até o momento, para o teor de 70% em volume de fibras, podendo ser materiais com comportamento promissor para testes como reforço estrutural.

Figura 96 – Módulo de elasticidade dos compósitos em estudo.

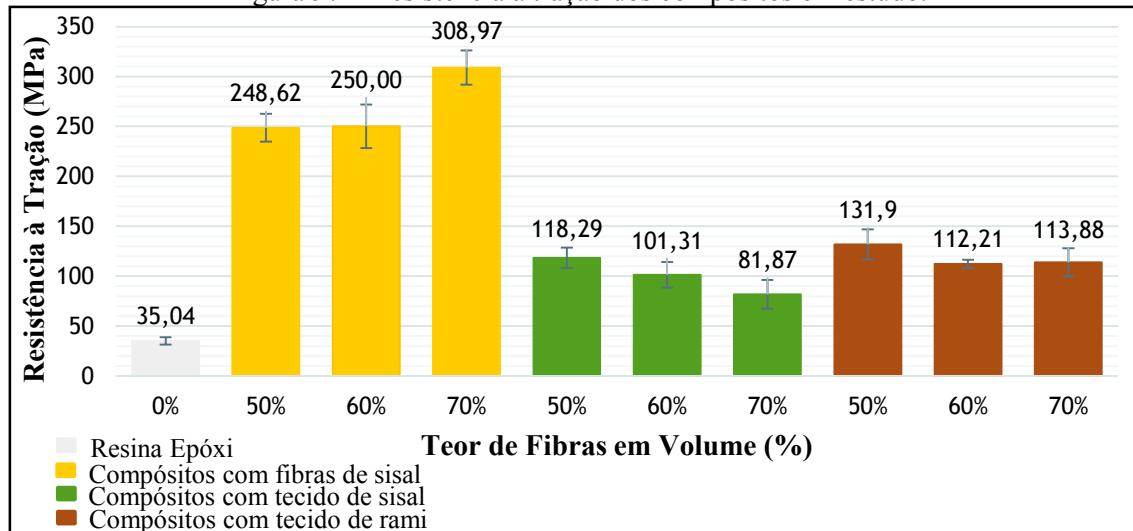


Fonte: AUTOR.

Comparando os valores de resistência à tração entre os compósitos estudados, observa-se que os reforçados com tecidos de rami e sisal apresentaram redução desta propriedade com o incremento de fibras na matriz, ao contrário dos compósitos com fibras de sisal que houve ganho na resistência à tração. Esta redução pode ter sido ocasionada pela falta de resina, prejudicando a interface fios/matriz, o que dificulta a distribuição das tensões da matriz para os fios. Como os fios de rami apresentam seção transversal menor que os fios de sisal, não prejudicou o módulo de elasticidade destes compósitos, ocorrendo a falha após maiores deformações.

Portanto, o compósito que apresenta melhor resistência à tração entre os três tipos de reforço são para as fibras de sisal, com teor de 70% em volume de fibras, apresentando valor de 309 MPa (Figura 97).

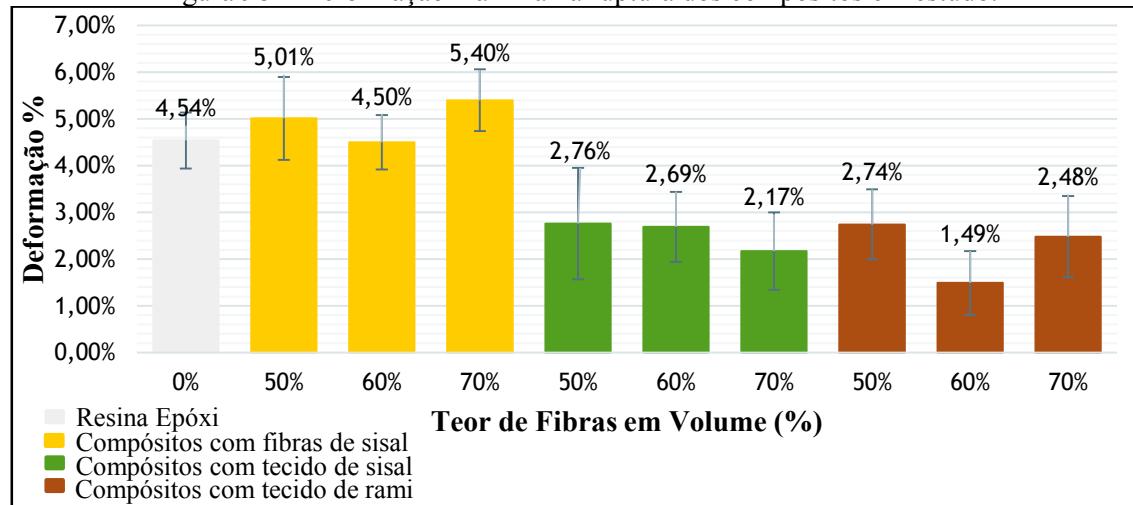
Figura 97 – Resistência à tração dos compósitos em estudo.



Fonte: AUTOR.

Os compósitos reforçados com tecidos de rami e sisal tiveram comportamento semelhante para a deformação máxima, apresentando redução desta propriedade com o incremento de fibras na matriz. Entretanto, os compósitos com fibras de sisal apresentaram maiores deformações na ruptura, sinalizando para uma melhor interação fibra/matriz (Figura 98).

Figura 98 – Deformação máxima na ruptura dos compósitos em estudo.

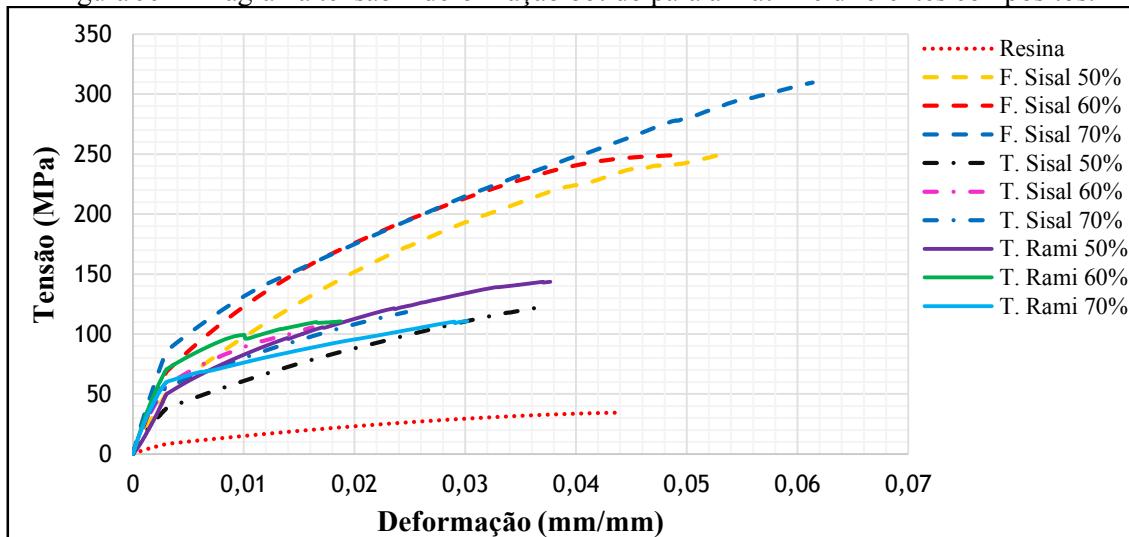


Fonte: AUTOR.

A Figura 99 ilustra as curvas tensão x deformação de todos os compósitos em um mesmo gráfico, ficam claras as diferenças nas propriedades mecânicas dos diversos tipos de compósitos estudados. Observa-se ainda que os compósitos reforçados apresentam rigidez

bem próxima, enquanto que o compósito com fibras de sisal com o teor de 70% de fibras se sobressai, apresentando maior módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação máxima na ruptura.

Figura 99 – Diagrama tensão x deformação obtido para a matriz e diferentes compósitos.



Fonte: AUTOR.

Como visto na revisão bibliográfica, Souza e Cunha (2011) fizeram uma análise numérica e teórica dos compósitos de resina epóxi reforçadas com fibras de rami. Os autores verificaram que os compósitos com teor de 70% destas fibras teriam um módulo de elasticidade de aproximadamente 30 GPa simulado pelo programa ANSYS® e 36 GPa através do método micromecânico. O módulo obtido para o compósito de rami com teor de 70% produzido experimentalmente neste trabalho foi muito próximo daquele simulado por Souza e Cunha (2011).

Ainda Souza e Cunha (2011) analisaram numericamente o desempenho destes compósitos vegetais como reforço no combate à flexão e ao esforço cortante em vigas de concreto armado, obtendo bons resultados. Como os compósitos de rami e sisal produzidos atingiram módulo de elasticidade próximo ou maior do que aquele simulado pelos autores, esta pesquisa avalia a viabilidade de reforçar vigas de concreto armado à flexão com estes materiais compósitos.

4.1.4.5 RUPTURA DOS COMPÓSITOS ENSAIADOS

A Figura 100 apresenta as amostras dos compósitos após a ruptura para cada teor de fibras estudado: resina, compósitos com fibras de sisal, tecido de sisal e tecido de rami respectivamente da esquerda para a direita.

Figura 100 – Corpos de prova ensaiados.



Fonte: AUTOR.

Observa-se macroscopicamente que as partes rompidas não foram totalmente separadas, porque parte das fibras não foram rompidas. Percebe-se também que os compósitos com alto teor de fibras ficaram com aspecto seco tendo a sensação da ausência de resina. O principal mecanismo de dano ocorreu na interface fibra/matriz.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES: FASE – 2

As análises realizadas neste tópico referem-se as vigas ensaiadas à flexão, para os grupos controle, RC, RR, RS, RCE, RRE e RSE com o objetivo de comparar a eficiência dos reforços de PRFVeg com os de PRFC para os dois tipos de ancoragem. Foram discutidos e analisados os modos de ruptura de todas as vigas ensaiadas e seus resultados, expondo os diagramas médios de força x deflexão e força x deformação, utilizando o método de ensaio da norma ABNT NBR 12142:2010.

4.2.1 TEOR DE FIBRAS DO REFORÇO APÓS MOLDAGEM

Após a desforma dos compósitos e retirada as rebarbas, as placas foram pesadas e verificadas suas dimensões, para calcular o teor de fibras e a massa aproximada da resina. Os valores obtidos para cada placa estão apresentados na Tabela 41 e Tabela 42.

Tabela 41 – Teores finais dos reforços com tecidos de rami.

Placa	Espessura (cm)	Volume (cm ³)	Massa compósito (g)	Massa fibra seca (g)	Massa resina (g)	Massa específica (g/cm ³)	Teor final de fibras em volume (%)
01	0,53	454,80	659,70	530,02	129,68	1,45	73%
02	0,56	475,85	682,30	540,55	141,75	1,43	71%

Fonte: AUTOR.

Tabela 42 – Teores finais dos reforços com fibras de sisal.

Placa	Espessura (cm)	Volume (cm ³)	Massa compósito (g)	Massa fibra seca (g)	Massa resina (g)	Massa específica (g/cm ³)	Teor final de fibras em volume (%)
01	0,56	478,19	702,70	531,60	171,10	1,47	74%
02	0,57	479,61	707,20	529,48	177,72	1,47	73%

Fonte: AUTOR.

4.2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Nesta seção estão apresentados os resultados referentes aos ensaios do concreto utilizado na produção das vigas. Os ensaios de resistência à tração e módulo de elasticidade foram realizados em máquina universal EMIC, conforme Figura 101.

Figura 101 – Ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: AUTOR.

Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos a ensaios de compressão axial, conforme as prescrições da ABNT NBR 5739:2007, e os ensaios de módulo de elasticidade, segundo a ABNT NBR 8522:2008. Foram realizados ensaios para as idades de 28 dias e na data de ensaio das vigas, conforme apresentados na Tabela 43 e Tabela 44.

Tabela 43 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto.

Idade (C)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
$f_{c,28\text{ dias}}$	27,80	2,29	8,26
$f_{c,144\text{ dias}}$	48,01	4,09	8,53

Fonte: AUTOR.

A ABNT NBR 6118:2014, permite estimar a resistência à compressão do concreto aos t (dias), em relação a idade aos 28 dias, dada pela expressão:

$$f_{cj} = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right] \right\} \cdot f_{c28dias} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

f_{cj} : resistência à compressão do concreto aos j dias.

$f_{c28dias}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

t : idade efetiva do concreto, em dias.

s : 0,20 para concreto de cimento CPV-ARI

s : 0,25 para concreto de cimento CPI e CPII

s : 0,38 para concreto de cimento CPIII e CPIV

Verificou-se que o valor da resistência à compressão aos 144 dias foi maior que o estimado pela norma ABNT NBR 6118:2014, considerando a resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 44 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto.

Idade (C)	E_c (GPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
28 dias	32,12	5,85	18,21
144 dias	44,98	1,71	3,79

Fonte: AUTOR.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, o módulo de elasticidade do concreto para a idade de 144 dias, estimado em função da resistência do concreto deveria ser de 44,12 GPa, obtendo valor praticamente igual ao do presente ensaio.

4.2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

As barras de aço, utilizadas na armação das vigas, foram ensaiadas à tração para determinação de suas propriedades mecânicas. Foram ensaiadas três amostras com diâmetro de 5 mm, conforme às especificações da ABNT NBR 7480:2007. Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios, marca EMIC, modelo DL-60000, com célula de carga de 600 kN. Foi soldado extensômetro, na região central da barra, para medida das deformações. A Tabela 45 apresenta os valores médios para tensão de escoamento e ruptura. A Figura 102 ilustra a realização do ensaio e o diagrama tensão x deformação obtido.

Tabela 45 – Resultado dos ensaios de tração das barras de aço utilizadas na armação das vigas.

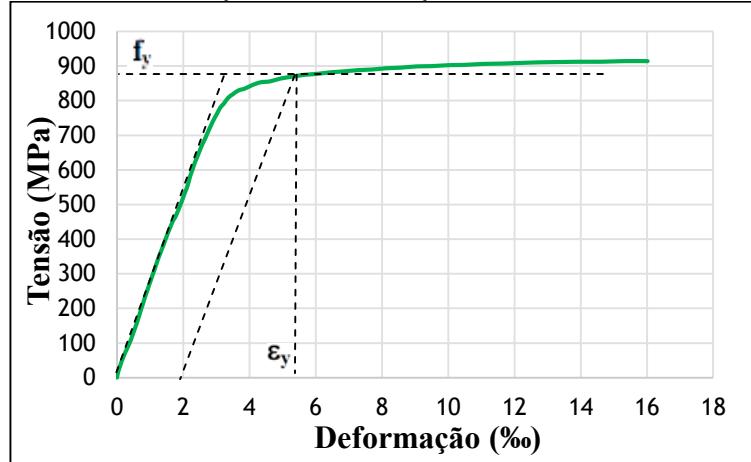
Diâmetro (mm)	Tensão de escoamento média (F_y) (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Tensão de ruptura média (F_r) (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
5	788,57	86,09	828,63	89,41

Fonte: AUTOR.

Figura 102 – Ensaio à tração da barra de aço.



a) Ensaio à tração

b) Curva tensão x deformação
Fonte: AUTOR.

4.2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ADESIVO EPÓXI

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão do adesivo epóxi e comparados seus valores com os resultados do fabricante. O ensaio foi realizado utilizando a máquina universal EMIC, modelo DL-60000, com célula de carga de 600 kN, conforme Figura 103. A Tabela 46 apresenta todos os valores obtidos neste ensaio.

Figura 103 – Ensaio de resistência à compressão do adesivo epóxi.



Fonte: AUTOR.

Tabela 46 – Propriedades de resistência à compressão do adesivo epóxi.

CP	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
1	73,15	61,48	10,42	16,94
2	53,12			
3	58,18			

Fonte: AUTOR.

Comparando os valores do fabricante com os do presente ensaio, percebe-se uma variação significativa. A Tabela 47 apresenta o valor médio obtido no ensaio e o valor declarado pelo fabricante, para resistência à compressão do adesivo epóxi.

Tabela 47 – Comparaçao da resistência à compressão do adesivo epóxi referente ao presente ensaio e fabricante.

Origem dos dados	Resistência à compressão (MPa)
Fabricante	70,00
Ensaio	61,48

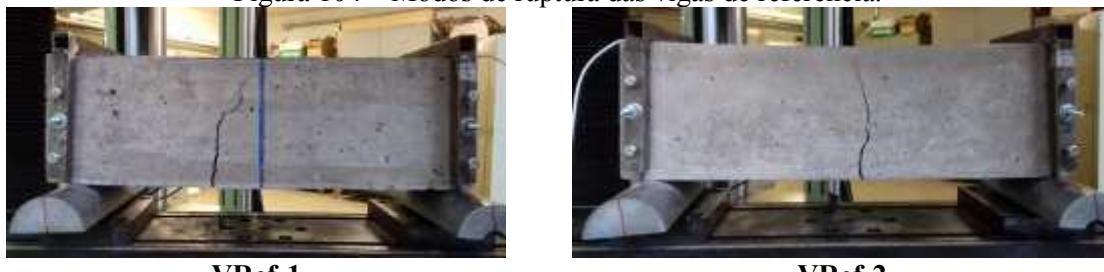
Fonte: AUTOR.

4.2.5 ENSAIO DAS VIGAS

4.2.5.1 MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS DO GRUPO CONTROLE

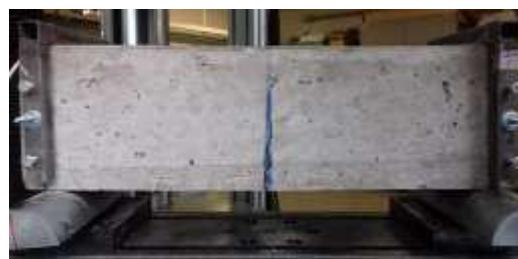
As vigas de referência foram ensaiadas à flexão, sendo que todas tiveram ruptura compatível com o dimensionamento, isto é, ruptura por escoamento da armadura tracionada sem esmagamento do concreto comprimido, conforme apresentado na Figura 104.

Figura 104 – Modos de ruptura das vigas de referência.



VRef-1

VRef-2



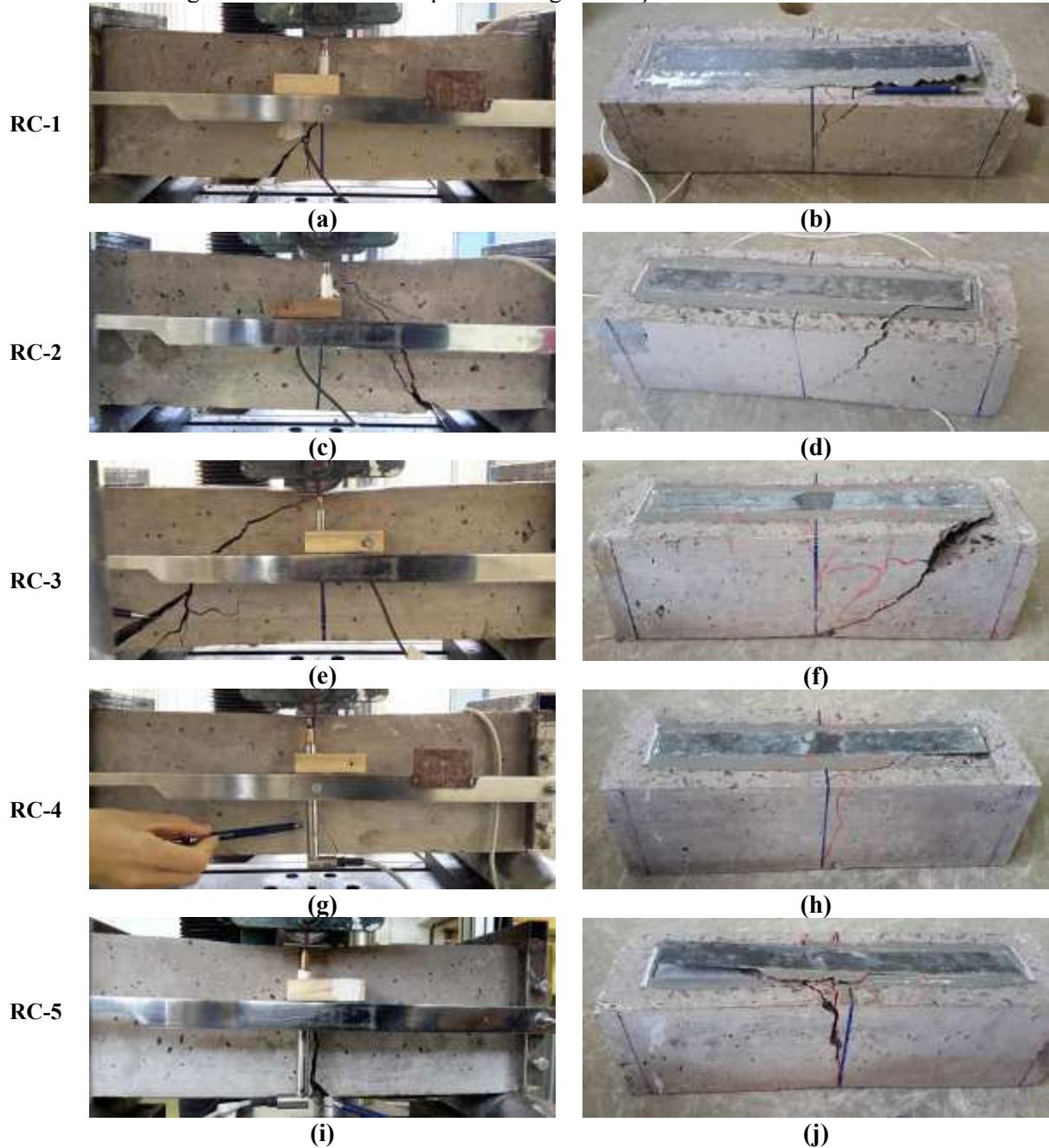
VRef-3

Fonte: AUTOR.

4.2.5.2 MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS DO GRUPO RC

A Figura 105 apresenta os modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFC-CSCC. Entre as vigas reforçadas, foram obtidos modos de ruptura distintos. Das cinco vigas ensaiadas, a RC-2 e RC-3 obtiveram ruptura por cisalhamento e as demais apresentaram ruptura por flexão.

Figura 105 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFC-CSCC.



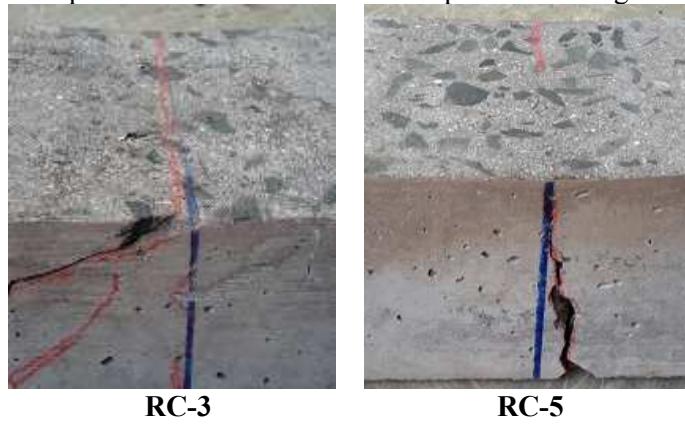
Fonte: AUTOR.

As Vigas RC-1, RC-2, RC-4 e RC-5 apresentaram descolamento do reforço previamente à ruptura. O descolamento do reforço é explicado pelo surgimento de fissuras intermediárias de flexão ou pela combinação de fissuras de flexão/cisalhamento que se propagam em direção à extremidade do reforço. Devido as altas tensões tangenciais e de tração na interface, excedem a resistência do elemento mais fraco, conduzindo à separação do reforço da viga.

Quando uma estrutura reforçada com PRF é solicitada à flexão, ocorre fissuração na zona tracionada do elemento estrutural. Nos pontos dessas fissuras o PRF fica altamente tensionado, transferindo essas tensões para as bordas das fissuras, tendo um acumulo de tensões neste local. As faces dessas fissuras, existentes no concreto, podem deslocar-se diferencialmente ocasionando um desvio vertical, o que resulta em flexão no reforço e tração no concreto. Se a resistência do concreto ou da resina for superada, ocorre então uma fissura na horizontal, tendo ruptura na interface concreto/resina (conforme ocorrido nas RC-1 e RC-4) ou resina/reforço (conforme ocorrido nas RC-2 e RC-5).

A viga RC-3 apresentou ruptura por cisalhamento, devido ao fato de ter alcançado sua capacidade máxima ao cisalhamento antes da falha por flexão, seguido pelo desprendimento da camada de cobrimento de concreto. As vigas RC-3 e RC-5 apresentaram o início da plastificação do concreto, ocorrendo fissuração no bordo comprimido no local de aplicação da força (Figura 106).

Figura 106 – Ruptura do concreto no bordo comprimido das vigas RC-3 e RC-5.

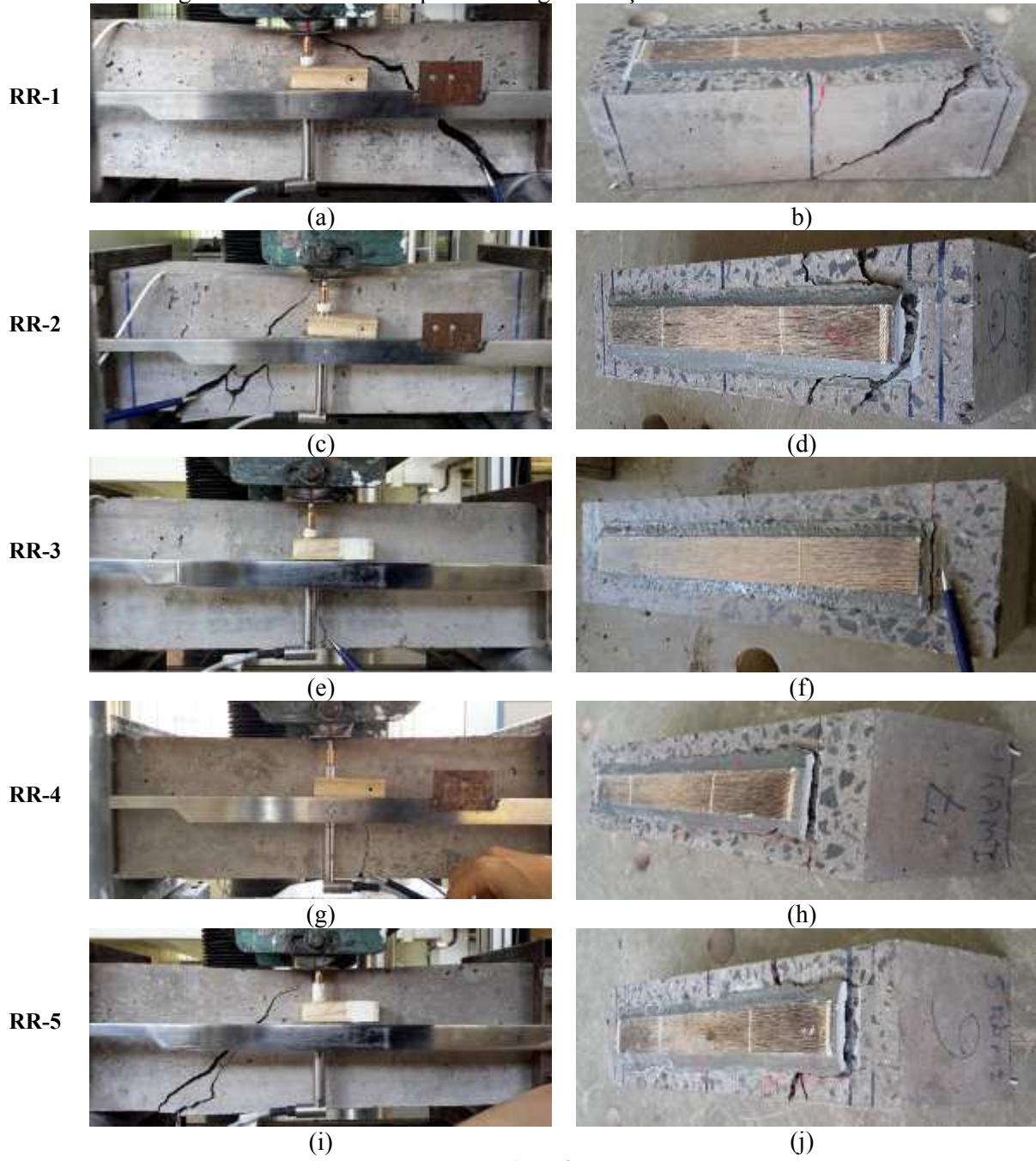


Fonte: AUTOR.

4.2.5.3 MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS DO GRUPO RR

A Figura 107 apresenta os modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFR-CSCC. Das cinco vigas ensaiadas, duas romperam por flexão e as demais por cisalhamento.

Figura 107 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFR-CSCC.



Fonte: AUTOR.

Analisando as vigas ensaiadas, observa-se que foram obtidos modos de ruptura distintos. É possível verificar que as vigas RR-1, RR-2 e RR-5 apresentaram ruptura por cisalhamento, sendo que as vigas RR-2 e RR-5 tiveram ruptura devido a separação do concreto da camada de cobrimento da armadura, seguido pelo descolamento do reforço. Alguns autores associam essa ruína da viga reforçada ao surgimento de fissuras combinadas, provocadas pelos esforços de flexão e cisalhamento. A Figura 108 mostra a separação de um fragmento de

concreto na forma triangular, devido a união de fissuras no banzo tracionado da viga reforçada.

Figura 108 – Ilustração dos modos de ruptura das vigas RR-2 e RR-5.

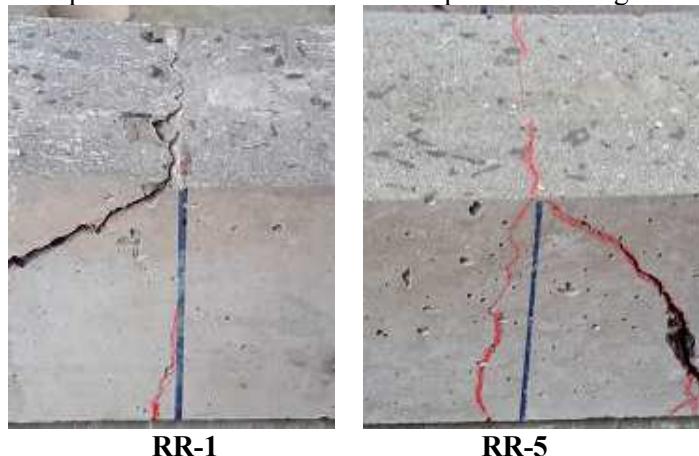


Fonte: AUTOR.

As vigas RR-3 e RR-4 sofreram ruptura por flexão seguido de descolamento do reforço. Isto aconteceu devido a concentração de tensões no substrato do concreto formando fissurações na interface concreto e adesivo ocorrendo então o descolamento do reforço.

As vigas RR-1 e RR-5 apresentaram fissuração no bordo comprimido do concreto, onde foi aplicada a força. Das amostras citadas, a viga RR-5 apresentou início da plastificação do concreto nesta região, enquanto na viga RR-1, a evolução do carregamento acarretou a abertura das fissuras e por consequência a ruptura do concreto nesta região (Figura 109).

Figura 109 – Ruptura do concreto no bordo comprimido das vigas RR-1 e RR-5.

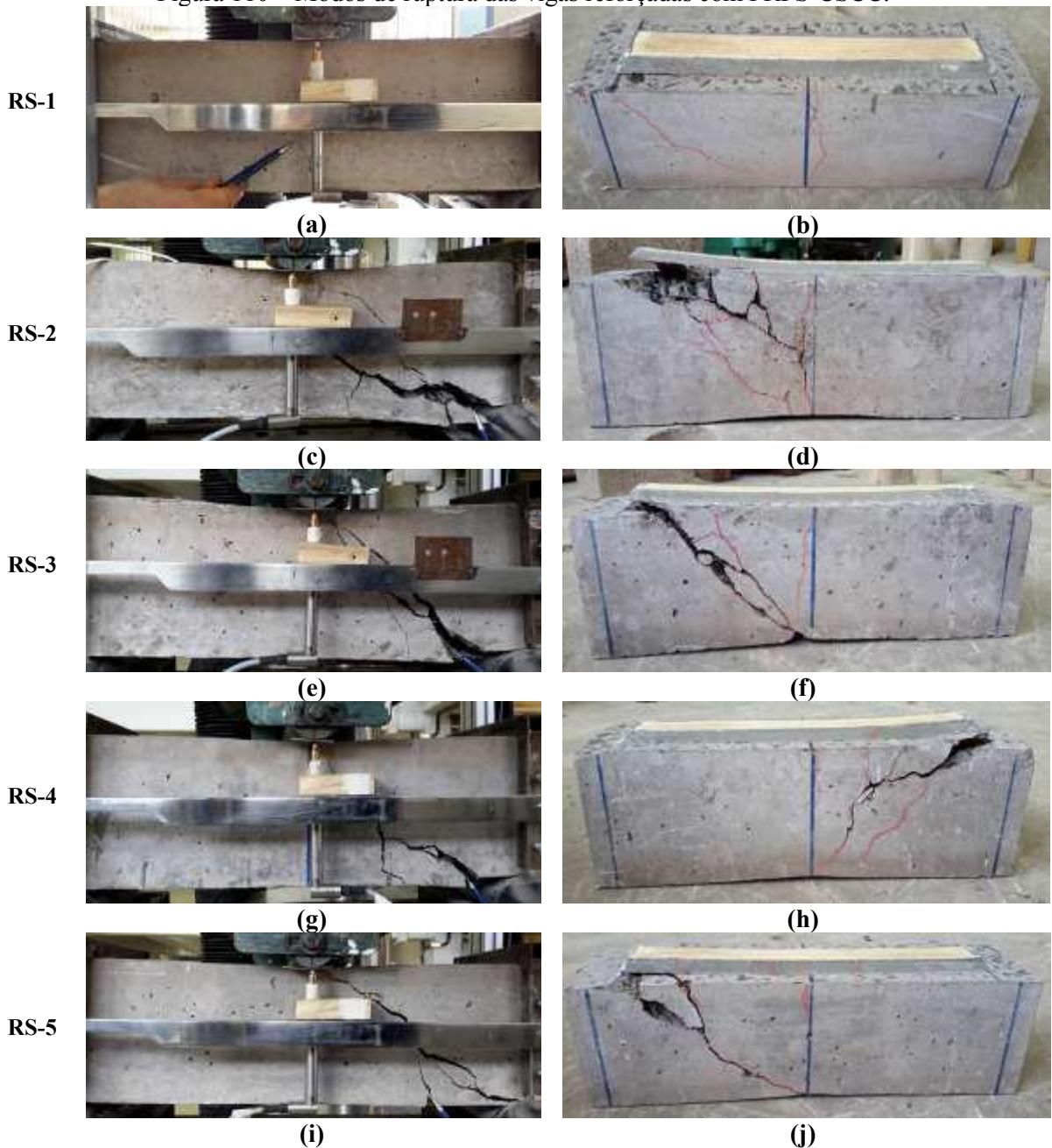


Fonte: AUTOR.

4.2.5.4 MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS DO GRUPO RS

A Figura 110 apresenta os modos de ruína das vigas reforçadas com PRFS-CSCC. Das cinco vigas ensaiadas, apenas uma rompeu por flexão e o restante por cisalhamento.

Figura 110 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFS-CSCC.

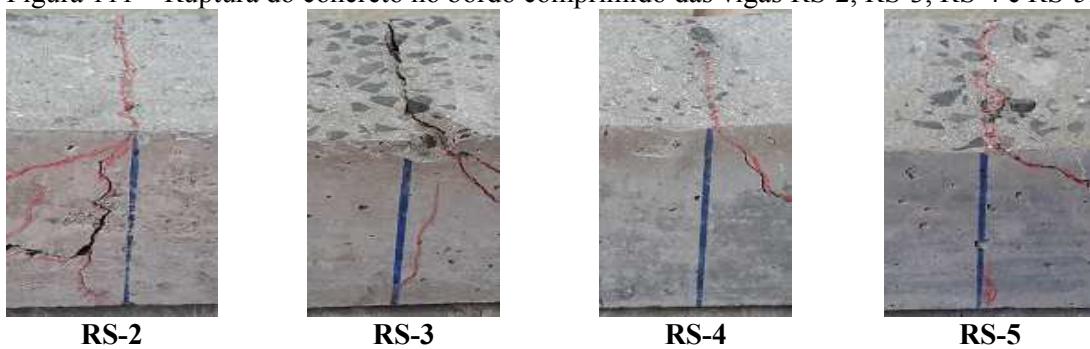


Fonte: AUTOR.

A viga RS-1 apresentou ruptura pelo descolamento do reforço na interface concreto/adesivo. Já as vigas RS-2, RS-3, RS-4 e RS-5 apresentaram ruptura na camada de cobrimento de concreto entre a armadura e o reforço. Isso ocorreu devido as altas tensões na interface que originaram fissuras no final ou próximo ao final do reforço. Essas fissuras se propagaram de forma inclinada até atingir o nível da armadura, progredindo horizontalmente ao longo da mesma, ocorrendo a separação das partes entre concreto e armadura. Este tipo de ruína não é considerada como descolamento do reforço, pois a ruptura ocorre afastada da ligação do reforço com o substrato do concreto.

Essas vigas também apresentaram fissuração no bordo comprimido, no local de aplicação da força. Observa-se que com a evolução do carregamento, as fissuras caminharam sentido à borda comprimida, ocorrendo ruptura do concreto nesta região, conforme observado na viga RS-3. As vigas RS-2, RS-4 e RS-5 apresentaram o início da plastificação do concreto. Isso ocorreu devido o concreto ter atingido sua deformação máxima (valor usual de $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 3,5\%$) (Figura 111).

Figura 111 – Ruptura do concreto no bordo comprimido das vigas RS-2, RS-3, RS-4 e RS-5.

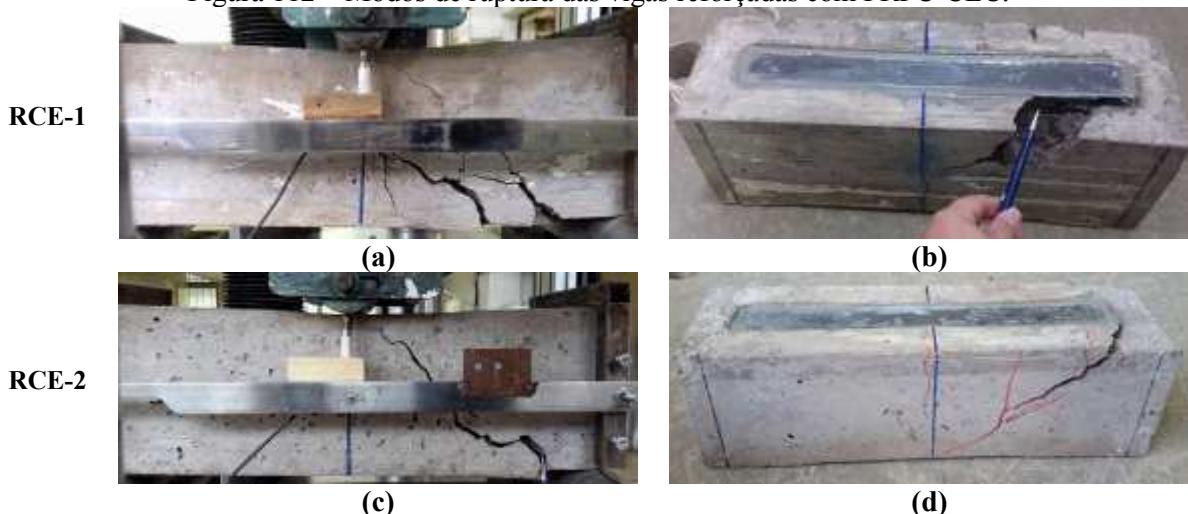


Fonte: AUTOR.

4.2.5.5 MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS DO GRUPO RCE

A Figura 112 apresenta os modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFC-CEC. Das duas vigas ensaiadas, ambas romperam por cisalhamento.

Figura 112 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFC-CEC.



Fonte: AUTOR.

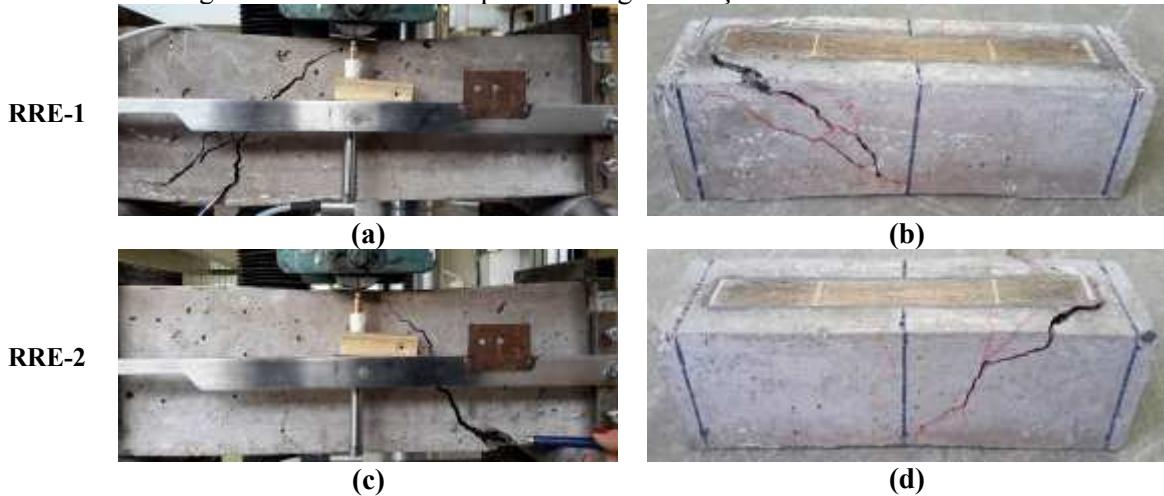
A viga RCE-1 apresentou descolamento do reforço na extremidade, decorrente da combinação de fissuras de flexão e cisalhamento que ocorreram na interface do

concreto/adesivo, seguido pelo desprendimento do cobrimento da armadura. Já a viga RCE-2 apresentou ruptura na camada de cobrimento de concreto entre a armadura e o reforço.

4.2.5.6 MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS DO GRUPO RRE

A Figura 113 apresenta os modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFR-CEC. Das duas vigas ensaiadas, ambas romperam por cisalhamento com ruptura na camada de cobrimento de concreto.

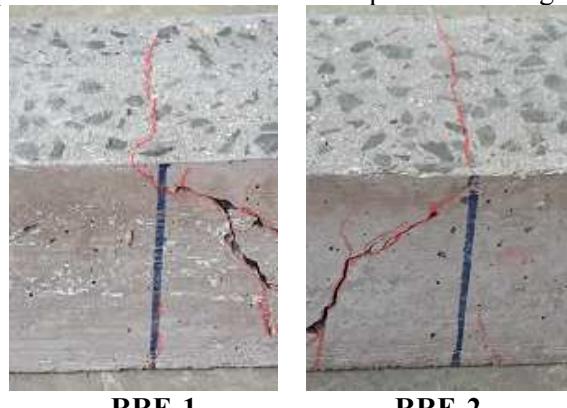
Figura 113 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFR-CEC.



Fonte: AUTOR.

Ambas as vigas apresentaram início de fissuração no banho superior, por ter excedido a deformação máxima do concreto $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 3,5\%$ (Figura 114).

Figura 114 – Ruptura do concreto no bordo comprimido das vigas RRE-1 e RRE-2.

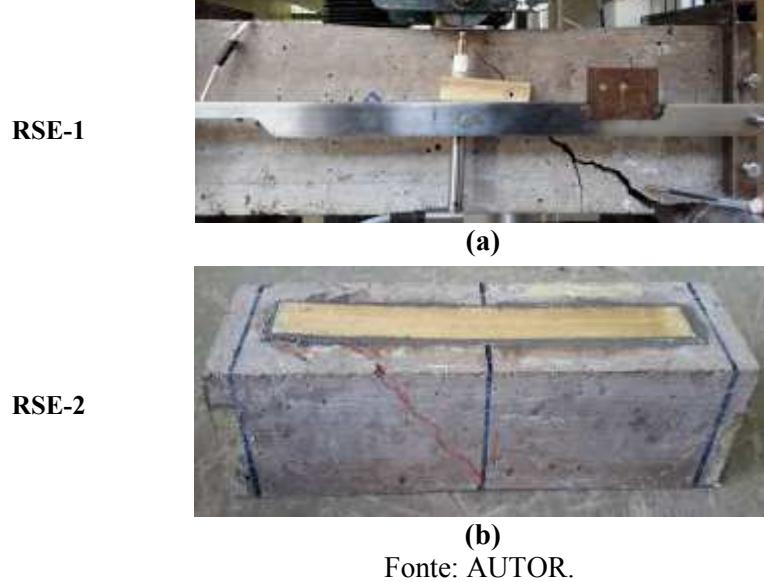


Fonte: AUTOR.

4.2.5.7 MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS DO GRUPO RSE

A Figura 115 apresenta os modos de falhas das vigas reforçadas com PRFS-CEC. Das duas vigas ensaiadas, ambas romperam por cisalhamento.

Figura 115 – Modos de ruptura das vigas reforçadas com PRFS-CEC.



Fonte: AUTOR.

A viga RSE-1 obteve ruptura pela camada de cobrimento do concreto e a viga RSE-2 apresentou ruptura pelo destacamento do compósito. Apenas a viga RSE-1 apresentou fissuração no local de aplicação da carga, ocorrendo o início da plastificação do concreto (Figura 116).

Figura 116 – Ruptura do concreto no bordo comprimido da viga RSE-1.



Fonte: AUTOR.

As vigas ensaiadas para todos os grupos apresentaram ruptura prematura, ou seja, ocorreram antes da seção atingir o esmagamento do concreto ou a ruptura do reforço por tração. As primeiras fissuras geradas nas vigas foram por flexão próximas ao meio do vão, na seção de momento fletor máximo. Entre os dois métodos de ancoragem, nota-se que a técnica de colagem em entalhes no concreto (CEC) apresentou maior eficiência do reforço em relação ao descolamento do PRF.

4.2.6 ESFORÇOS GERADOS NAS VIGAS

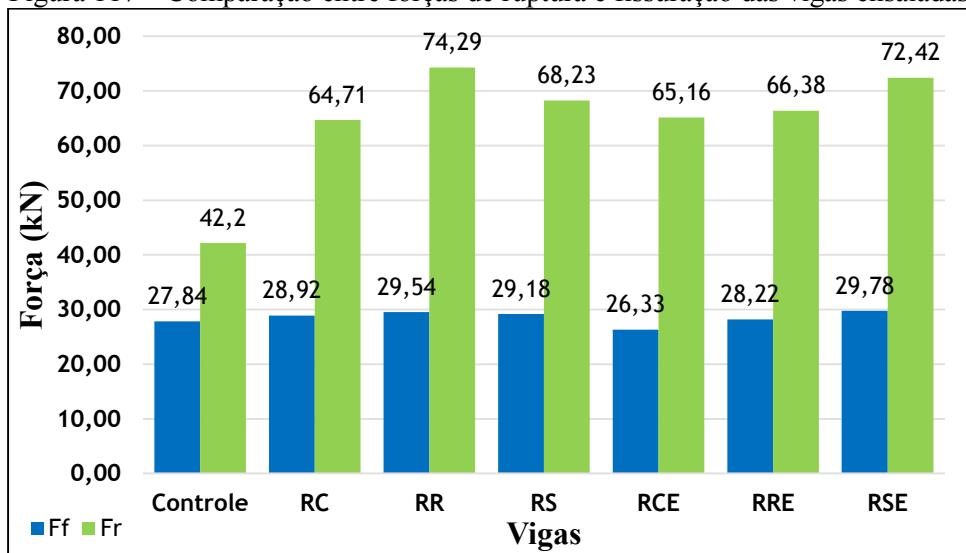
A influência dos reforços de PRFC e PRFVeg e o método de ancoragem sobre o comportamento das vigas podem ser observados através da análise da Tabela 48 e das comparações estabelecidas na Figura 117. Esta tabela apresenta os valores médios da carga de primeira fissura (F_f), ruptura (F_r) e o acréscimo de resistência obtido em relação ao grupo controle e, entre parênteses estão expostos os valores de desvios padrão.

Tabela 48 – Esforços e modos de ruptura das vigas prismáticas.

Grupo	Técnica de colagem do reforço	F_f (kN)	F_r (kN)	Acréscimo de força (%)		Modos de ruptura
				F_f	F_r	
Controle	-	27,84 (3,09)	42,20 (2,02)	-	-	Escoamento da armadura
RC	CSCC	28,92 (3,94)	64,71 (6,80)	3,88	53,34	Descolamento do reforço e ruptura da camada de cobrimento de concreto
RR		29,54 (1,79)	74,29 (4,82)	6,11	76,04	Descolamento do reforço e ruptura da camada de cobrimento de concreto
RS		29,18 (2,31)	68,23 (6,31)	4,81	61,68	Descolamento do reforço e ruptura da camada de cobrimento de concreto
RCE	CEC	26,33 (3,39)	65,16 (3,41)	2,55	54,41	Ruptura da camada de cobrimento de concreto
RRE		28,22 (0,50)	66,38 (1,40)	14,11	57,30	Ruptura da camada de cobrimento de concreto
RSE		29,78 (0,81)	72,42 (0,04)	22,81	71,61	Descolamento do reforço e ruptura da camada de cobrimento de concreto

Fonte: AUTOR.

Figura 117 – Comparação entre forças de ruptura e fissuração das vigas ensaiadas.



Fonte: AUTOR.

Conforme visto na Figura 117, constata-se que com a presença do reforço à flexão, houve um pequeno aumento na força de primeira fissura, exceto para as vigas do grupo RCE. Analisando as vigas dos grupos RC, RR e RS, nota-se que houve comportamento semelhante para todos os tipos de reforço. Os aumentos médios verificados em relação às vigas sem reforço foram, respectivamente, da ordem de 3,88%, 6,11% e 4,81% respectivamente. Para os grupos RCE, RRE e RSE, observa-se que as vigas reforçadas com os compósitos vegetais apresentam maior força de fissuração comparadas com as vigas reforçadas com os compósitos de carbono, tendo as vigas do grupo RSE o melhor desempenho mecânico. Neste caso, os aumentos verificados em relação às vigas sem reforço foram de 5,42% (negativo), 1,36% e 6,97% respectivamente.

Consequentemente, com a presença do reforço à flexão nas vigas de concreto armado, houve também aumento considerável na força de ruptura. Avaliando os grupos das vigas reforçadas e ancoradas pelo método CSCC, se destacam aquelas referentes ao grupo RR que obteve carga última mais elevada, com acréscimo de carga de 76,04% em relação às vigas de referência. Para as vigas com o reforço inserido na camada de cobrimento do concreto (CEC), o grupo RSE apresentou melhor desempenho mecânico, com acréscimo de carga de 71,61% em relação às vigas de referência.

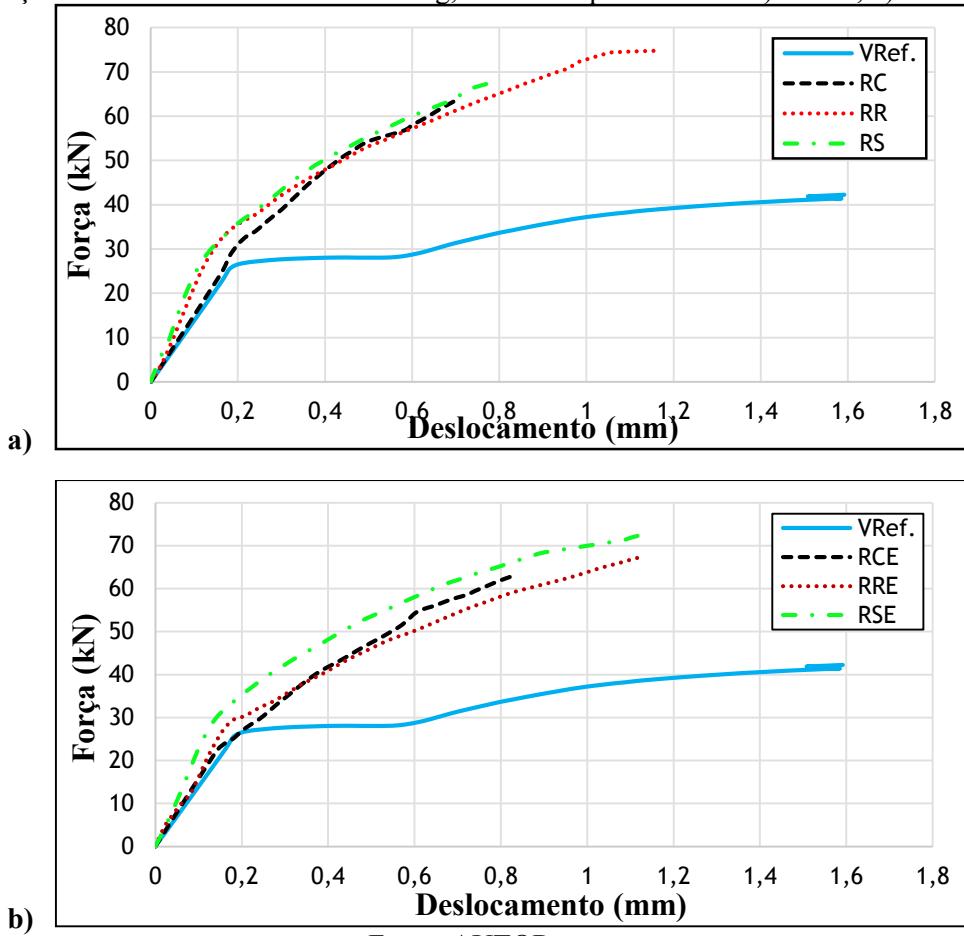
Levando em consideração os valores estabelecidos pela Tabela 48 e Figura 117, pode-se dizer que as técnicas de ancoragem mostraram desempenho parecidos. As vigas do grupo RC apresentaram praticamente a mesma força de ruptura das vigas do grupo RCE, enquanto que as vigas dos grupos RR e RS apresentaram valores na ordem de 10,65% inferior e 6,14% superior em relação as vigas dos grupos RRE e RSE.

Portanto, pode-se ver claramente que as vigas reforçadas com PRFVeg apresentam desempenho semelhantes aos das vigas reforçadas com PRFC e até melhor, mesmo alternando o tipo de fibras na matriz dos compósitos e a ancoragem dos reforços nas vigas. Dos seis grupos avaliados como reforço, as vigas do grupo RR atingiram carga última média mais elevada. Nota-se também que as vigas dos grupos RS, RRE e RSE apresentaram maior resistência comparadas com as vigas reforçadas com laminado de carbono. Isso mostra que os reforços de PRFVeg exerceram influência sobre a força de ruptura das vigas reforçadas, tendo um acréscimo na força última de 14,80% e 5,44% em relação às vigas do grupo RC e 1,87% e 11,14% em relação as vigas do grupo RCE.

4.2.6.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

O deslocamento vertical de uma viga depende de vários fatores, sendo eles o carregamento, propriedades dos materiais, geometria da seção transversal, vão e vinculação. No momento em que é incorporado um material reforçante em uma estrutura, ocorre aumento significativo da rigidez do elemento estrutural. Esta rigidez torna-se mais evidente após a ocorrência da primeira fissura do concreto, antes o comportamento de todas as vigas é semelhante. Isto ocorre pois, após a fissuração, o reforço passa a atuar, impedindo a abertura das fissuras e consequentemente os deslocamentos verticais e deformações (BEBER, 2003). A Figura 118 apresenta o desempenho dos sistemas de reforços, através das curvas médias obtidas experimentalmente de força x deslocamento vertical, no meio do vão, para as vigas sem reforço e reforçadas, ancoradas pelo método (CSCC) e (CEC).

Figura 118 – Diagrama força x deslocamento médio, obtidos para as vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC e PRFVeg, ancoradas pelo método: a) CSCC, b) CEC.



Fonte: AUTOR.

Entre os dois métodos de ancoragem, verifica-se que a presença do reforço à flexão nas vigas de concreto armado, apresentou um pequeno aumento na rigidez e elevação na força de

ruptura. Nota-se também que as vigas ficaram próximas da carga correspondente ao escoamento do aço.

A aplicação do reforço com PRFVeg, melhorou o comportamento pós fissuração e a ductilidade das vigas, aumentando a capacidade de carga e de deformação antes da ruptura. Nota-se ainda que a extensão do trecho final das curvas das vigas reforçadas com PRFVeg, sinalizam que os reforços foram mais solicitados do que para as vigas reforçadas com PRFC.

Percebe-se também que nas vigas de referência, houve pouco acréscimo de força após o escoamento da armadura longitudinal tracionada. Porém, para as vigas reforçadas, observa-se que ocorre elevado acréscimo de força após o escoamento da armadura.

Observando a Figura 118a e Figura 118b, nota-se que os ramos ascendentes das curvas referentes às vigas reforçadas com PRFVeg, obtiveram melhor rigidez inicial comparadas com as vigas reforçadas com PRFC. Isto pode ter sido ocasionado devido ao módulo de elasticidade do adesivo epóxi ser próximo ao do concreto e dos PRFVeg, com isso tais reforços absorveram melhor as deformações geradas nas vigas inicialmente do que os reforços de carbono, em que parece ocorrer uma espécie de “escorregamento” entre os compósitos de elevado módulo e a estrutura, pela maior deformação do adesivo, comparado ao reforço.

Para uma melhor análise dos resultados, fez-se um comparativo entre os deslocamentos verticais médios, no vão central das vigas, quando as mesmas eram submetidas a um carregamento igual a 90% da força de ruptura, das vigas de referência (VRef.), do grupo controle. Os dados de ensaio neste momento estão apresentados na Tabela 49.

Tabela 49 – Comparativo das flechas médias para carregamento igual a 90% da carga de ruptura das vigas de referência.

Viga	Flecha (mm)	Comparativo (%)
VRef.	1,07	100
RC	0,27	25
RR	0,24	22
RS	0,24	22
RCE	0,34	32
RRE	0,34	32
RSE	0,24	22

Fonte: AUTOR.

Os valores mostram que as vigas reforçadas com ambos os compósitos (vegetais e carbono) obtiveram menores deslocamentos que as vigas de referência considerando uma mesma

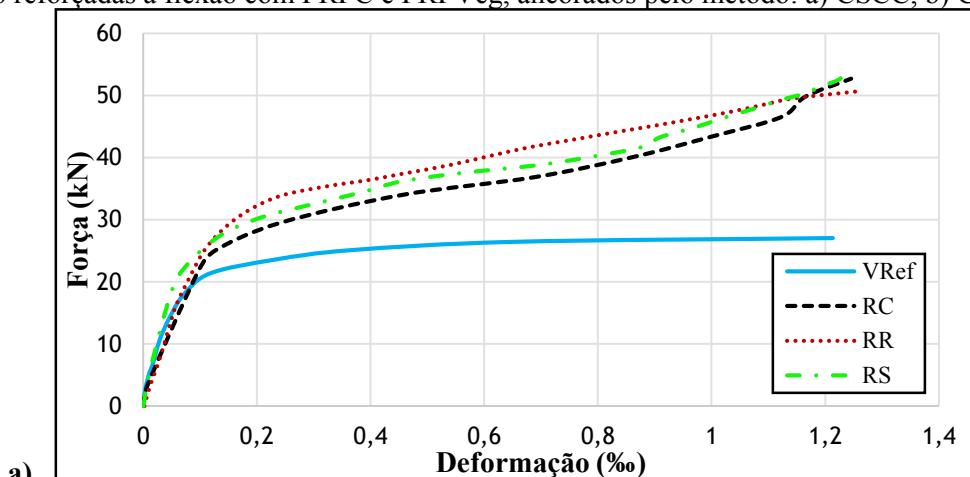
carga aplicada, o que confirma que o reforço foi eficaz. Analisando os grupos das vigas reforçadas pela técnica (CSCC), nota-se que a flecha das vigas RC foi 25% da flecha das vigas VRef. O deslocamento das vigas RR e RS apresenta o mesmo valor, correspondendo a 22% da flecha das vigas de referência submetidas à mesma carga. Isto mostra que o comportamento de todas as vigas reforçadas foi parecido, comprovando a veracidade dos resultados obtidos pela simulação numérica no programa ANSYS®.

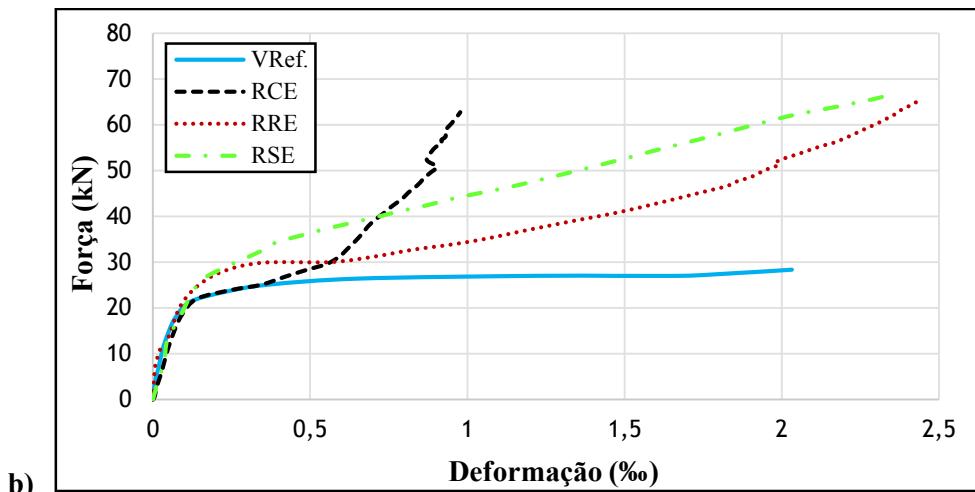
Para os grupos das vigas com o reforço inserido na camada de cobrimento do concreto, observa-se que as vigas dos grupos RCE e RRE apresentam o mesmo deslocamento, tendo menor rigidez comparadas com as vigas dos grupos RC e RR. Porém, as vigas do grupo RSE tiveram o mesmo deslocamento das vigas RS, tendo a flecha igual a 22% das vigas de referência, em ambas as formas de ancoragem do reforço. Portanto, a inovação proposta neste trabalho, que é reforçar vigas de concreto armado à flexão por meio de colagem destes materiais compósitos de resina epóxi com fibras de rami e sisal, não somente é eficiente em termos de capacidade de carga, como também em termos de rigidez, tendo ainda as vantagens de ser um material natural, renovável, com baixo custo que não agride o meio ambiente durante sua produção.

4.2.6.2 DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NA ARMADURA

A Figura 119 apresenta a evolução do comportamento estrutural das vigas VRef, RC, RR, RS, RCE, RRE e RSE, em relação a força x deformação média das armaduras longitudinais de tração, situadas na região central das vigas. Da análise dos diagramas é possível tecer os comentários a seguir.

Figura 119 – Diagramas força x deformação da armadura, obtidos para as vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC e PRFVeg, ancorados pelo método: a) CSCC, b) CEC.





Fonte: AUTOR.

Não foi possível fazer a leitura de deformação no momento de ruptura das vigas da Figura 119a, pelo fato de ter ocorrido fissuração na região onde estavam localizados os extensômetros, danificando os mesmos no momento de fissuração. Porém, para as vigas da Figura 119b, pode-se obter deformações correspondentes à carga de ruptura.

Comparando o comportamento das vigas de referência com as reforçadas, nota-se que as forças correspondentes às deformações nas armaduras longitudinais de tração foram maiores nas vigas reforçadas do que nas vigas de referência. Estes gráficos mostram que os reforços absorvem uma parcela das tensões aplicadas, aliviando as tensões no substrato, permitindo ao sistema absorver maiores solicitações.

Comparando os diferentes reforços das vigas dos grupos RC, RR e RS, nota-se desempenho semelhante entre eles, embora os compósitos vegetais apresentam, em via de regra, forças mais elevadas, absorvidas pela estrutura em relação aos compósitos de carbono.

Para as vigas reforçadas pelo método CEC, ocorre o mesmo observado na Figura 119a. Observa-se também que com a evolução do carregamento, os compósitos de carbono tendem a ter ruptura com deformações em torno de 1%, já os compósitos vegetais tendem a obter ruptura com deformações próximas a 2,5%, tornando a ruptura menos frágil.

4.3 SIMULAÇÃO DA VIABILIDADE ESTRUTURAL EM UMA SITUAÇÃO REAL

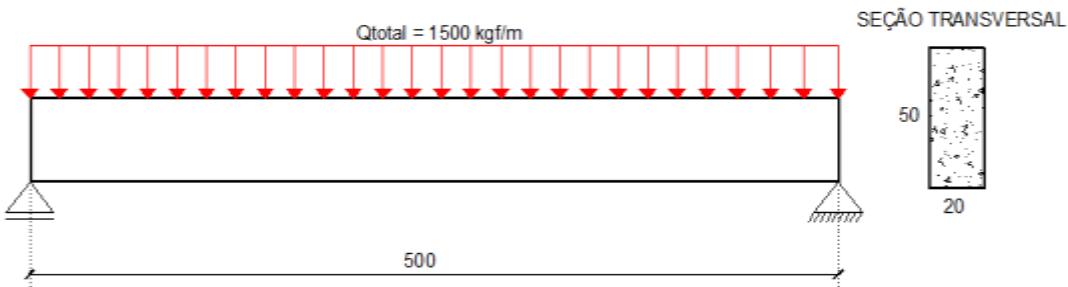
Com o propósito de sair da situação de estudo com escala reduzida, foram realizadas simulações numéricas em vigas de concreto armado reforçadas com PRFC e PRFVeg e

submetidas à flexão com carregamento uniformemente distribuído. A ideia é avaliar a viabilidade do uso do reforço de PRFVeg em comparação ao reforço de PRFC, em outros elementos estruturais próximos a situações reais de serviço. A simulação foi realizada utilizando a mesma metodologia do item 3.4, a fim de verificar a espessura específica dos reforços vegetais para esta condição.

4.3.1 DIMENSIONAMENTO

Foi adotada uma viga bi-apoiada, com 5 metros de vão livre e seção transversal de 20 cm de largura e 50 cm de altura, possuindo carregamento linear uniformemente distribuído de 1500 Kgf/m, considerando peso próprio, reações em laje e peso da alvenaria. Esta viga foi dimensionada no limite do domínio 3 para que tenha o máximo aproveitamento do concreto e que tenha ruptura por flexão com escoamento da armadura longitudinal. O momento gerado na viga foi de 4687,50 kN x cm. A Figura 120 apresenta o esquema de ensaio para a viga a ser modelada no programa ANSYS®.

Figura 120 – Detalhamento de ensaio de uma viga em situação real de serviço.



Fonte: AUTOR.

A armadura longitudinal de flexão necessária para o momento fletor igual à 4687,50 kN x cm foi obtida pela aplicação da Equação 5, a qual resultou numa área de aço de 3,14 cm².

$$A_s = \frac{M_d}{\sigma_{sd} \cdot (d - 0,4x)} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

A_s : área da seção transversal da armadura longitudinal de tração.

M_d : momento fletor resistente de cálculo do concreto.

σ_{sd} : tensão de escoamento do aço.

d: altura útil da viga.

x: posição da linha neutra em relação à borda comprimida da seção.

A partir do dimensionamento da armadura de flexão, foram adotados para armadura longitudinal inferior $3\phi 12,5$ mm, para a armadura longitudinal superior foram adotados $2\phi 5$ mm, visto que para este caso, têm função somente de porta-estribo.

O dimensionamento da armadura transversal foi feito utilizando o modelo de cálculo I da ABNT NBR 6118:2014 (item 17.4.2.2), o qual admite diagonais de compressão inclinadas de 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e que a parcela complementar de força cortante (V_c) tenha valor constante. Considerando a carga de projeto de 1500 kgf/m, obteve-se força cortante de cálculo (V_{sd}) de 52,5 kN. A parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça (V_c) é de 70,64 kN. Como V_c foi maior que V_{sd} , neste caso os próprios mecanismos resistentes do concreto seriam capazes de absorver o cisalhamento atuante. Todavia, a ABNT NBR 6118:2014 estabelece o uso de armaduras mínimas ao cisalhamento dada pela Equação 6.

$$a_{sw\ min.} = \frac{20 \times f_{ctm} \times bw}{f_{ywk}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$a_{sw\ min.}$: área mínima da seção transversal da armadura transversal.

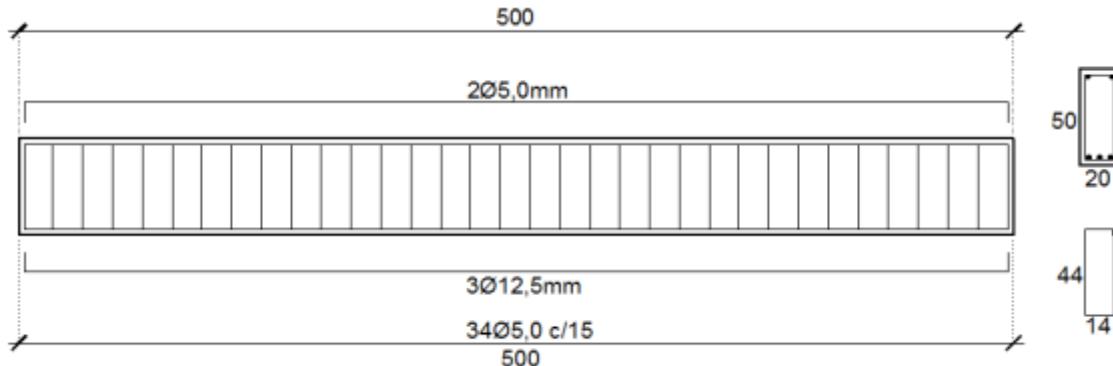
bw : largura da viga

f_{ctm} : resistência à tração direta do concreto.

f_{ywk} : resistência ao escoamento do aço.

A área mínima calculada foi de $1,46 \text{ cm}^2/\text{m}$, sendo adotados $\phi 5,0$ mm espaçados a cada 20 cm. Devido ao espaçamento máximo permitido, foram utilizados $\phi 5,0$ mm espaçados a cada 15 cm, permitindo que a viga seja submetida a um esforço cortante de cálculo de até 117 kN. O detalhamento e as propriedades utilizadas no dimensionamento da viga estão apresentados na Figura 121 e Tabela 50.

Figura 121 – Detalhamento da armadura de uma viga em situação real de serviço.



Fonte: AUTOR.

Tabela 50 – Propriedades físicas e mecânicas utilizadas no dimensionamento da viga.

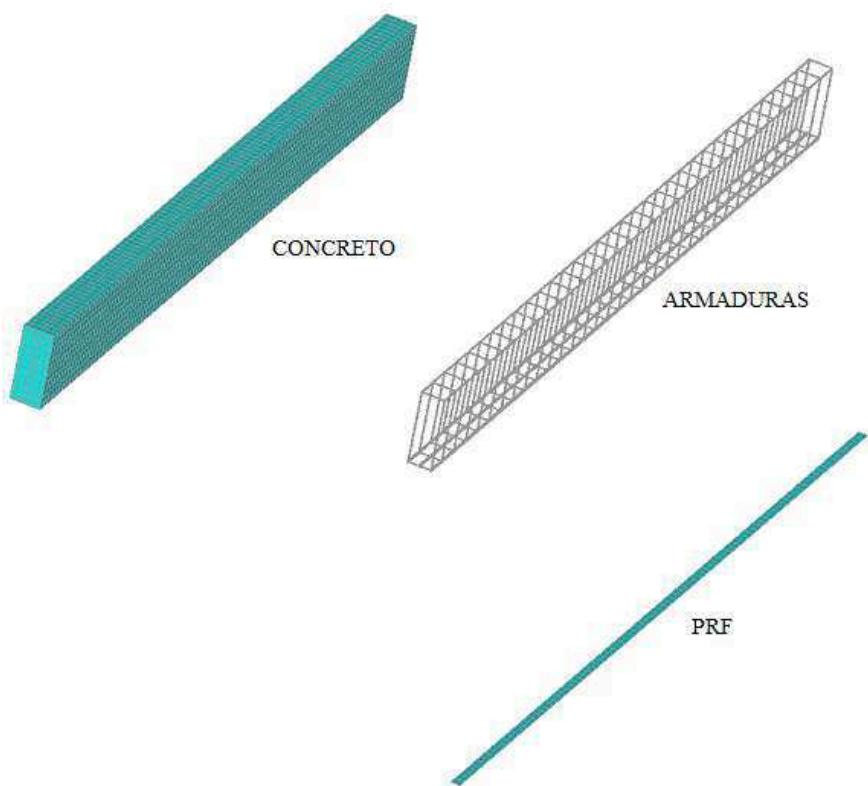
Propriedades	Descrição	Valor
A_s	Área de aço	3,14 cm ²
b_w	Largura da seção da viga	20 cm
h	Altura da seção da viga	50 cm
d	Altura util da seção	45,9 cm
E_s	Módulo de elasticidade do aço	21000 kN/cm ²
V_c	Força cortante resist. pelo concreto	70,64 kN
V_{sd}	Força cortante de cálculo	52,50 kN
f_{ctm}	Resistência à tração direta do concreto	0,183 kN/cm ²
f_{yk}	Resistência característica do aço	50 kN/cm ²
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão	2,5 kN/cm ²
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto	1,79 kN/cm ²
ε_c	Deformação máxima do concreto	3,5‰
ε_s	Deformação máxima do aço	2,07‰

Fonte: AUTOR.

4.3.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS VIGAS REFORÇADAS

Foi confeccionado inicialmente um protótipo experimental de referência, utilizando a viga dimensionada anteriormente e reforçada com uma camada de PRFC (espessura imposta). Em seguida, foi submetida à flexão com o mesmo carregamento de 1500 kgf/m para simular as tensões no compósito de fibras de carbono. As faixas de PRFC com dimensões de 5 cm x 480 cm, foram posicionadas na região central inferior da viga, onde as tensões normais são maiores, tendo 10 cm de distância dos apoios. As propriedades mecânicas e os elementos dos materiais utilizados na modelagem foram os mesmos considerados nas simulações das vigas reforçadas do item 3.4. O esquema geral do modelo numérico de elementos finitos da viga reforçada está ilustrado na Figura 122.

Figura 122 – Modelo de elementos das vigas reforçadas.



Fonte: AUTOR.

Para a análise do desempenho dos compósitos vegetais foram aplicadas cargas verticais uniformemente distribuídas na estrutura reforçada com PRFVeg de rami e sisal, o qual sofreu variação na espessura para alcançar desempenho estrutural semelhante ao dos compósitos com fibras de carbono. A Tabela 51 apresenta os resultados obtidos pela simulação numérica.

Tabela 51 – Resultados das diferentes modelagens do reforço no combate ao momento fletor.

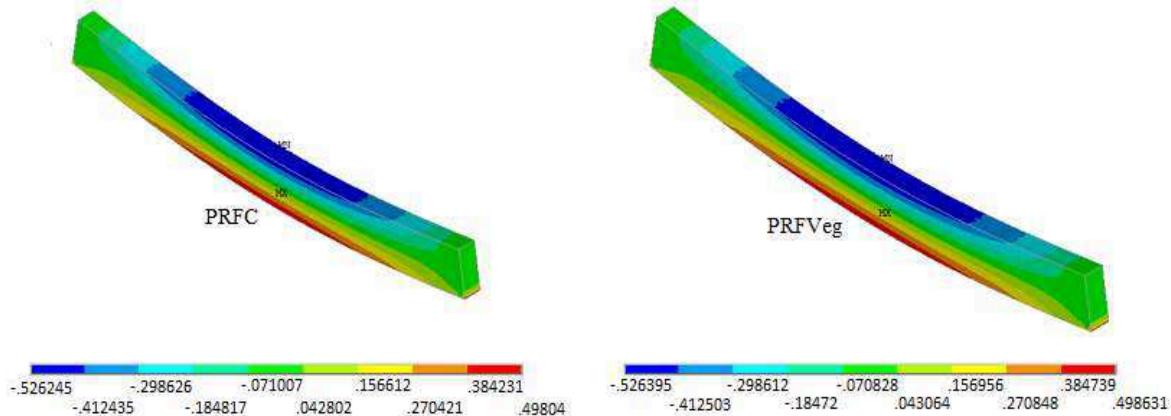
PRF	Espessura do Reforço (cm)	Tensão (kN/cm ²)	
Carbono	0,127	Superior	0,51592
		Inferior	0,49804
Rami	0,56	Superior	0,51607
		Inferior	0,49864
Sisal	0,55	Superior	0,51607
		Inferior	0,49863

Fonte: AUTOR.

Observa-se que, para situações reais de serviço, o reforço vegetal apresentou a mesma espessura das vigas reforçadas com PRFVeg, estudadas experimentalmente neste trabalho. Isto significa que, para obter o mesmo desempenho dos laminados de carbono, o reforço vegetal necessitou de uma espessura de 4,33 vezes maior que o PRFC, sendo assim viável

para reforço à flexão de vigas de concreto armado. A Figura 123 mostra a distribuição das tensões no eixo x geradas pelo carregamento da viga reforçada com compósitos de carbono e vegetais.

Figura 123 – Distribuição das tensões σ_x na viga reforçada com PRFC e PRFVeg.



Fonte: AUTOR.

Embora as análises numéricas apresentadas aqui mostrem a viabilidade de utilização do PRFVeg, para uma conclusão mais precisa e definitiva seria necessário a realização de ensaios experimentais.

4.4 COMPARAÇÃO DE CUSTOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS COMO REFORÇO

Para comparar os custos dos compósitos produzidos com os laminados de carbono (PRFC), primeiramente foram obtidos os preços dos materiais necessários para a produção das placas de compósitos vegetais com teores de 73% de fibras. A quantidade de material utilizada para confeccionar os compósitos vegetais e os seus respectivos custos podem ser observados na Tabela 52 e Tabela 53. A Tabela 54 apresenta o custo do produto final do compósito de carbono por kg.

Tabela 52 – Composição de custo do compósito reforçado com tecidos de rami 73%.

Item	Materiais	Fornecedor	Quantidade	Custo	
				Unitário	Total
1	Resina epóxi SQ 2004	Avipol	1,20 kg	R\$ 55,00	R\$ 66,00
2	Endurecedor resina epóxi SQ 3131	Avipol	0,18 kg	R\$ 70,00	R\$ 12,67
3	Fios de rami	Sisalsul	0,53 kg	R\$ 40,00	R\$ 21,20
MASSA DA PLACA			0,6597 kg	VALOR TOTAL	R\$ 99,87
CUSTO / KG				R\$ 151,39	

Fonte: AUTOR.

Tabela 53 – Composição de custo do compósito reforçado com fibras de sisal 73%.

Item	Materiais	Fornecedor	Quantidade	Custo	
				Unitário	Total
1	Resina epóxi SQ 2004	Avipol	1,20 kg	R\$ 55,00	R\$ 66,00
2	Endurecedor resina epóxi SQ 3131	Avipol	0,18 kg	R\$ 70,00	R\$ 12,67
3	Fibras de sisal	Sisalsul	0,53 kg	R\$ 15,00	R\$ 21,20
MASSA DA PLACA			0,7072 kg	VALOR TOTAL	R\$ 86,28
CUSTO / KG				R\$ 122,00	

Fonte: AUTOR.

Tabela 54 – Custo do compósito reforçado com fibras de carbono 68%.

Item	Materiais	Fornecedor	Quantidade	Custo	
				Unitário	Total
1	Laminado de carbono	Viapol	0,096 kg	R\$ 74,03	R\$ 74,03
MASSA PARA 1 M			0,096 kg	VALOR TOTAL	R\$ 74,03
CUSTO / KG				R\$ 771,15	

Fonte: AUTOR.

Os compósitos utilizados no reforço estrutural foram previamente pesados. A partir do custo dos compósitos por quilograma, foi possível obter o preço dos laminados com as dimensões adotadas nos experimentos. A Tabela 55 apresenta a massa dos compósitos utilizados no reforço estrutural, seus respectivos preços e o incremento na resistência das vigas, ocasionado pela adição do elemento de reforço estrutural.

Tabela 55 – Massa dos compósitos usados no reforço estrutural, custo relativo e incremento na resistência das vigas reforçadas com ancoragem pelo método CSCC.

Reforço	Massa (kg)	Custo (R\$)	Incremento na resistência da viga (%)
PRFC - 68%	0,038	29,61	53,34
PRFVeg de sisal - 73%	0,176	21,57	76,04
PRFVeg de rami - 73%	0,165	24,97	61,68

Fonte: AUTOR.

Observa-se na Tabela 55 que tanto o reforço com PRFVeg de sisal 73% quanto o reforço com PRFVeg de rami 73% apresentaram menor custo relativo e possibilitaram um maior incremento na resistência da viga. Os compósitos de sisal apresentaram um custo 27% inferior em comparação a utilização dos PRFC, enquanto que os compósitos de rami, um custo de 16% inferior. No entanto, os compósitos de sisal e rami apresentaram respectivamente uma massa de 363% e 334% superior aos laminados PRFC. O elevado peso dos compósitos pode aumentar os custos relacionados ao transporte. É importante enfatizar que, em um projeto de reforço estrutural, devem ser avaliados os custos de transporte,

manuseio e mão de obra antes de escolher o material mais adequado para promover o reforço estrutural. Os benefícios provenientes da utilização de compósitos de fibras naturais já citados anteriormente, a excelente performance e o baixo custo de produção tornam estes materiais promissores para aplicação como reforço estrutural. A manufatura destes materiais também pode vir a diminuir ainda mais os custos de fabricação, tornando o produto mais competitivo no mercado de reforço estrutural. Ressalta-se que os preços utilizados para os materiais dos compósitos com fibras vegetais não foram preços de atacado, pois foram adquiridos em pequenas quantidades comparadas às quantidades adquiridas numa produção industrial, portanto a indústria certamente conseguiria produzi-los com custo mais baixo. Ressalta-se ainda que o preço do laminado de carbono já tem embutido os custos de produção e lucros.

4.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS REFORÇOS NA CARGA DE RUPTURA POR ANOVA

A análise da variância (ANOVA) é um procedimento utilizado para a comparação de três ou mais grupos. Esta comparação é feita a partir da análise da dispersão presente no conjunto de dados. Para comparar e verificar se houve diferença significativa dos três tipos de reforços estudados e seu método de ancoragem, foi utilizada a análise da variância-ANOVA nos resultados obtidos quanto à força de ruptura das vigas estudadas. A Tabela 56 apresenta os resultados estatísticos obtidos entre todas as séries ensaiadas.

Tabela 56 – Análise da variância entre VRef, RC, RR, RS, RCE, RRE e RSE.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	2153,032	6	358,8386	13,30057	1,34375E-05	2,69866
Dentro dos grupos	458,6461	17	26,97918			
Total	2611,678	23				

SQ é a soma dos quadrados de todos os desvios em relação à média de todas as observações (entre e dentro das amostras); gl é o grau de liberdade; MQ é a média quadrática (entre e dentro das amostras).

$$F = \frac{\text{variância entre amostras}}{\text{Variância dentro das amostras}}$$

valor-P é a probabilidade da hipótese nula ser verdadeira. Adotou-se o nível de significância do teste de 0,05.

F crítico é o valor calculado em função do nível de significância e dos graus de liberdade da variância entre e dentro das amostras.

Fonte: AUTOR.

Conforme verificado na Tabela 56, houve evidência de que o tipo de reforço influenciou na carga de ruptura, pois F obtido foi maior que Fcrítico e, também, o valor-P foi inferior a 0,05. Embora as vigas ensaiadas tenham rompido por cisalhamento, a rigidez da parte reforçada pode ter influenciado nos mecanismos de distribuição de tensões, permitindo as variações de carga verificadas.

Também foi realizada a análise da variância-ANOVA para verificar se houve influência na carga de ruptura entre as séries reforçadas e ancoradas pelos dois métodos de ancoragem. A Tabela 57 apresenta os resultados estatísticos obtidos entre as vigas dos grupos RC, RR e RS e a Tabela 58, as vigas dos grupos RCE, RRE e RSE.

Tabela 57 – Análise da variância entre as vigas RC, RR e RS.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	211,0936	4	52,77341	1,145501	0,389974	3,47805
Dentro dos grupos	460,7017	10	46,07017			
Total	671,7953	14				

Fonte: AUTOR.

Tabela 58 – Análise da variância entre as vigas RCE, RRE e RSE.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,571267	1	7,571267	0,455698	0,536651	7,708647
Dentro dos grupos	66,45867	4	16,61467			
Total	74,02993	5				

Fonte: AUTOR.

Os resultados mostram que a influência dos diferentes tipos de reforços para cada tipo de ancoragem não foram significativos, visto que o F obtido foi menor que o Fcrítico. Salienta-se que os reforços não foram totalmente solicitados, pelo fato de alguns reforços terem descolado e pelas vigas terem apresentado ruptura por cisalhamento. Estes resultados permitem concluir ainda que os reforços com os compósitos de fibras vegetais apresentaram desempenho similar aos já consagrados compósitos com fibras de carbono.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a viabilidade do uso de PRFVeg em substituição aos compósitos de fibras de carbono para reforço à flexão em vigas de concreto armado, com o desenvolvimento de três passos principais:

1. O primeiro passo foi a produção e caracterização dos compósitos poliméricos reforçados com fibras/tecidos de rami e sisal, nos teores de 50%, 60% e 70% em volume de fibras. Analisando as propriedades mecânicas destes materiais foi possível observar que:

Com a incorporação do teor de fibras de sisal e tecido de rami nos compósitos, os resultados mostraram que o módulo de elasticidade apresentou melhoria até o teor de 70%, enquanto que para a resistência à tração obteve uma redução desta propriedade, exceto para os compósitos de fibras de sisal que apresentou melhoria até o teor de 70%, obtendo valor de aproximadamente 309 MPa. Acredita-se que, como os fios de rami apresentam diâmetros maiores do que as fibras de sisal, a diminuição do volume de resina nos compósitos com maiores teores de fibras prejudicou a transferência de tensões da matriz para os fios, ocorrendo apenas após maiores deformações, não prejudicando o módulo de elasticidade.

Os resultados obtidos para os compósitos com tecidos de sisal apresentaram acréscimos no módulo de elasticidade até a fração de 60%, havendo redução desta propriedade para o teor de 70%, indicando que, para o reforço com esta relação de aspecto, o teor ótimo estaria entre 50% e 60%. A queda deste resultado ocorreu pelo fato da sessão transversal dos fios serem grandes, na ordem de 2 mm, faltando resina e prejudicando a transferências das tensões para o reforço, comprometendo as propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade para teores elevados.

Portanto, os compósitos com os melhores valores de módulo de elasticidade foram aqueles com teor de 70% em volume de tecidos de rami e fibras de sisal, apresentando valor na ordem de 35 GPa, os quais foram utilizados para testes de reforço à flexão em vigas de concreto armado.

2. No segundo passo foi feita análise numérica das estruturas reforçadas para determinar a espessura necessária do reforço nas vigas, em que os compósitos vegetais resultaram num valor de 5,5 mm para alcançar desempenho mecânico semelhante do PRFC. A respeito da simulação numérica, foi realizado um estudo mais qualitativo do que quantitativo, onde procurou-se estudar a viabilidade do PRFVeg como reforço estrutural. Para ser mais preciso, seria necessário o dimensionamento formal, além de uma modelagem numérica mais precisa, com critérios de ruptura. Em relação ao dimensionamento, não foi feito pelo fato de faltarem parâmetros (coeficientes de segurança, por exemplo) para limitar as tensões, deformações e flechas, o que para o reforço vegetal não existem normas e artigos científicos atualmente. Já para os laminados de carbono o dimensionamento é bem estabelecido. Finalmente, optou-se em utilizar como parâmetro principal de quantificação do comportamento das vigas o estado limite último, que é a tensão normal na face inferior e superior do concreto, até porque o estado limite de utilização analisado, que é a flecha, apresenta poucas alterações quando se acrescenta e quando se muda o reforço.

3. O trabalho foi finalizado com um estudo experimental das vigas reforçadas, comparando o efeito de três tipos de reforço (carbono, rami e sisal), com duas técnicas diferentes de ancoragem do reforço na estrutura. Analisando os dados das vigas ensaiadas, os resultados experimentais mostraram que:

Os compósitos com fios de rami e fibras de sisal sinalizaram ser mais eficientes do que os reforços com fibras de carbono, em termos de rigidez nos primeiros momentos de carregamento. Acredita-se que, como o módulo de elasticidade do adesivo epóxi é bem próximo ao do concreto e dos reforços vegetais, ambos contribuíram para melhor absorção dos esforços gerados inicialmente nas vigas do que os reforços de carbono.

A influência do tipo de fibra no reforço das vigas não foi significante no que diz respeito ao incremento de carga, modo de ruptura e fissuração, uma vez que os reforços das vigas foram dimensionados para promoverem os mesmos incrementos de carga. Os reforços que apresentaram maiores forças na ruptura entre as vigas reforçadas foram os compósitos com

fios de rami colados pelo método CSCC e os compósitos com fibras de sisal colados pela técnica CEC, apresentando incremento da capacidade de carga de 76,04% e 71,61% em relação as vigas de referência, respectivamente.

Em relação à técnica de colagem do reforço na estrutura, ambos os métodos não influenciaram significativamente no aumento da força de ruptura e na rigidez das vigas. O fato de ambas as técnicas apresentarem o mesmo comportamento foi pelo motivo das vigas terem rompido por cisalhamento, por ter alcançado sua capacidade máxima ao cortante antes da falha por flexão.

Os modos de ruptura das vigas reforçadas foram frágeis para ambos as técnicas de ancoragem, envolvendo o rompimento das vigas por destacamento ou descolamento do reforço, seguido pelo esmagamento do concreto no banzo comprimido. Apesar do acréscimo de força das vigas reforçadas com PRF-CSCC, o descolamento dos reforços que foram observados é uma grande desvantagem para a técnica. Acredita-se que a resina não conseguiu transferir todos os esforços para o reforço, ocorrendo o rompimento do concreto e descolamento do reforço. A Técnica de colagem do PRF-CEC apresentou maior eficiência reduzindo o modo de ruptura das vigas pelo descolamento do reforço.

Em estudos de comparação de custos dos reforços estudados, os compósitos vegetais apresentaram custos até 27% inferiores aos laminados de carbono, podendo vir a diminuir ainda mais os preços destes compósitos, tornando o produto ainda mais competitivo no mercado de reforço estrutural. Com o aumento da utilização deste material, a comercialização de fibras vegetais e PRFVeg pode começar a ser feita em escala industrial e sustentável.

A partir da análise de variância dos resultados experimentais obtidos, pode-se concluir que os compósitos vegetais com fibras de sisal e fios de rami possuem um grande potencial para reforço de estruturas de concreto armado, apresentando desempenho similar aos polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC).

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Otimizar o processo de manufatura destes materiais com objetivo de diminuir a espessura destes compósitos vegetais tornando materiais leves, reduzindo ainda mais o custo e com excelentes propriedades mecânicas;

- Avaliar as propriedades mecânicas de compósitos epóxi reforçados com as fibras de rami e sisal moldados a quente, pois este processo reduz a viscosidade da resina facilitando o preenchimento dos vazios;
- Aplicar estes reforços vegetais também ao cisalhamento para verificar o incremento de carga em relação aos laminados de carbono;
- Investigar a aplicação destes compósitos vegetais em outros elementos estruturais como vigas com maiores vãos, lajes, pilares, alvenaria estrutural e estruturas de madeira;
- Avaliar outras formas de ancoragem para não ocorrer o desprendimento dos PRF;
- Estudo de durabilidade destes compósitos vegetais, por exemplo, exposição a elevadas temperaturas;
- Avaliar a influência da espessura máxima dos compósitos;
- Investigações sobre os métodos de controle da qualidade, nas diversas etapas de preparação dos compósitos, que possam minimizar a dispersão nos resultados considerando possíveis variações das propriedades das fibras.

REFERÊNCIAS

ACI-COMMITTEE 222. **Corrosion of Metals in Concrete**. ACI 222R-85. American Concrete Institute Journal. p. 3-32, 1985.

ALIPPI, A.; MAYER W. G. **Ultrasonic Methods in Evaluation of Inhomogeneous Materials**. Technology & Engineering, 2012.

ALMEIDA, T. G. M. **Reforço de Vigas de Concreto Armado por Meio de Cabos Externos Protendidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

ALMEIDA, I. R. Influência da resistência à abrasão do agregado na resistência à abrasão de concretos de alto desempenho. In: **Congresso Brasileiro do Concreto – REIBRAC**, 42, 2000, Fortaleza. Anais. São Paulo: IBRACON, 2000.

ALKHRDAJI Tarek and THOMAS Jay. Techniques and Design Considerations for Upgrade of Parking Structures. **National Parking Association**, v. 41, n. 5, p. 6, Washington, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Committee 201**, Guide to Durable Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide For the Design and Construction of Externally Bonded Systems for Strengthening Concrete Structures** – ACI 440, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039**: Standard Test Method For Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Philadelphia, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638**: Standard Test Method For Tensile Properties of Plastics. Philadelphia, 2012.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. Patologia das Estruturas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2v. Cap.32, p.953-983, 2005.

ANGELINI, L.G.; LAZZERI, A.; LEVITA, G.; FONTANELLI, D.; BOZZI, C. Ramie (Boehmeria nivea (L.) Gaud.) and Spanish Broom (Spartium junceum L.) fibres for composite materials: agronomical aspects, morphology and mechanical properties. **Industrial Crops and Products**, Italy, v.11, p.145-161, 2000.

APPLETON, J.; GOMES, A. Reforço de Estruturas de Betão Armado por Adição de Armaduras Exteriores. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estrutura**, N.º41, 1997. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/Artigos/RN10.pdf>. Acesso

em: 01/02/2016.

ARAÚJO, C. M. Reforço de Vigas de Concreto à Flexão e ao Cisalhamento com Tecidos de Fibra de Carbono. Dissertação (Mestrado de Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

ARQUEZ, A. P. Aplicação de Laminados de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) Inserido em Substrato de Microconcreto com Fibras de Aço para Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ARYA, A. S.; BOEN, T.; ISHIYAMA Y. Guidelines for Earthquake Resistant Non-Engineered Construction. Paris, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: 2015. 9 p.

_____. NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 2007. 9 p.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: 2008. 16 p.

BARBOSA, A. P. Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2011.

BARRA, G.M.O. ; Compósito poliuretano/fibra natural: preparação e estudo da viabilidade de utilização de fibra naturalinorgânica. Monografia do concurso público de professor adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BARUD, H. S. Novos Materiais Multifuncionais Baseados em Celulose Bacteriana. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2010.

BEBER, A. J. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibras de Carbono. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BEBER, A. J.; CAMPOS FILHO, A; CAMPAGNOLO, J. L. Reforço de Estruturas e Concreto Armado com Tecidos Pré-Impregnados de Fibras de Carbono. **Revista Téchne**, São Paulo, n.45, p. 52-55, 2000.

BENATTI JR., Romeu. Rami: Planta Têxtil e Forrageira. 1^a ed.: São Paulo. Ed. Nobel, 1988.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites**. Londres e Nova Iorque: Elsevier Applied Science, 2007.

BLASS, Arno. **Processamento de polímeros**. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1985.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. - **Progress in Polymer Science**. v.24, p.221, Oxford, 1999.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. P. **Caderno de Engenharia de Estruturas**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 1999.

BRIEMEL, P.-A. **Simulation numérique du renforcement de structures en béton armé par des renforts en fibres végétales et comparaison au renforcement par des fibres de carbone**. Projet de Fin d'étude, INSA de Strasbourg/Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

CAETANO, L. F. GRAEFF, A. G. GARCEZ, E. O. BERNARDI, S. T. SILVA FILHO, L. C. P. **Compósito de matriz cimentícia reforçada com fibras**. II Seminário de Patologia das Edificações - Novos Materiais e Tecnologias Emergentes 18 a 19 de novembro de 2004 - Salão de Atos II - UFRGS - Porto Alegre, 2004.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering**. Nova York: Ed. John Wiley & Sons. Inc., 1997.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering – An introduction**. New York, 2007.

CAMPBELL, F.C. **Structural Composite Materials**. Ohio: ASM International®, 2010.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: PINI, 1988.

CANAVAL, J. H.; SILVA, T. J. Estudo da ligação entre substrato e graute em reforço de vigas de concreto armado. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 58, Anais. Belo Horizonte: IBRACON, 2016.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CARVALHO, L. H. & CAVALCANTI, W. S. Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 16, no 1 p. 33-37, 2006.

CASTRO, E. K. **Reforço em vigas “T” de concreto armado com vários tipos de compósitos em entalhes no cobrimento de concreto (CEC)**. Tese (Doutorado em

Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

CHAVES, L. P. **Estudo da distribuição do reforço de lajes de concreto armado com fibras de carbono, usando otimização topológica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

COMMITTEE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB (1983), **Assessment of concrete structures and design procedures for upgrading (redesign)**, Bulletin d'Information nº. 162.

CUNHA, J. **Curso básico do programa de elementos finitos ANSYS®**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, 2012.

CUNHA, J., CHAVES, L. P. The use of topology optimization in disposing carbon fiber reinforcement for concrete structures. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v.49, p.1009 - 1023, 2014.

CURTIN, W.A. Determining fiber strength versus gage length. **Polymer Composites**, Virginia, v. 15, n. 6, p. 474-478, 1994.

DA SILVA, T. J.; AGOSTINHO, P. C. P. Refuerzo con pretensado exterior de vigas de hormigón armado de um edificio. In: **XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**. Santiago, 2008.

DIAS, S. J. E. **Verificação Experimental do Reforço com CFRP de Estruturas de Betão à Flexão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2001.

DIMANDE, A. O. **Influência da Interface no Reforço à Flexão de Estruturas de Betão com sistemas de PRF**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651**: Test method for metallic fiber-reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). CEN, London, 2007. 15 p.

FAA. **Aviation Maintenance Technician Handbook – Airframe**, Oklahoma City, v. 1, p. 588, 2012.

FAO 2009. **Natural Fibres Ramie/Sisal** International Year of Natural Fibres. IYNF Coordinating Unid Trade and Markets Division Food and Agriculture Organization of the United Nations Viele delle Terme di Caracalla Roma Itália 2009. Disponível em: <http://www.naturalfibres2009.org/en/fibres/ramie.html>. Acesso em: 06/03/2016.

FERREIRA, A. C. R. P.; CUNHA, J. Análise da Distribuição do Reforço com Fibras de Carbono em Vigas de Concreto Armado. **Ciência e Engenharia**, v. 22, n. 2, pp. 47 – 56, 2013.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem.

Acta Scientiarum. Technology, v. 24, 2002; p. 1783-1791.

FERRARI, V. J.; HANAI, J. B. Reforço à Flexão De Vigas De Concreto Armado Com Manta de Polímero Reforçado Com Fibras de Carbono (PRFC) Aderido a Substrato de Transição Constituído por Compósito Cimentício de Alto Desempenho. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 11, n. 51, p. 37-56, 2009.

FERRARI, V. J.; HANAI, J. B. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer (CFRP) sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, 2012; p. 596-626.

FIDELIS, M. E. A. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, p. 149-157, 2013.

FORTES, A. S. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FREIRE, E. C.; MEDEIROS, J. C.; ANDRADE, F. P. **Cultura do Rami no Agreste Nordestino**. Campina Grande: Embrapa - CNPA, 1996.

GAMINO, A.L. **Modelagem física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFRP**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GARCEZ, M. R. **Alternativas Para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas Pela Colagem de Polímeros Reforçados Com Fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

GARCIA, T. A.; "Materiales para refuerzo y rehabilitación de estructuras", **Seminarios CEMCO 2001 sobre materiales compuestos avanzados en la construcción**, Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja, Madrid, España, 2001.

GARDEN, H.N; HOLLOWAY, L.C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. **Composites Part B**, v. 29B, p. 411-424, 1998.

GIACOMIN, N. P. **Compósitos reforçados com fibras naturais para a indústria automobilística**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, p.21, São Carlos 2003.

GOMES, A.; APPLETON, J. Strengthening design of concrete beams by addition of steel plates. **In Proceedings of the International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering Science (EPMESC VII)**. Edited by E. Arantes e Oliveira and J. Bento. Elsevier, Macau, 657-666, 1999. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/Artigos/CI18.pdf>. Acesso em : 01/02/2016.

GOWAYED, Y. **Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for**

Civil Engineering. Edited by Nasim Uddin, Auburn University, USA, 2013.

H. KU *et al.* A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Journal Elsevier**, Composites: Part B 42, Australia, p. 856 – 873, 2011.

HEIZA, K.; NABIL, A.; MELEKA N.; TAYEL, M. State-of-the Art Review: Strengthening of Reinforced Concrete Structures – Different Strengthening Techniques. **Sixth International conference on Nano-Technology in Construction**, Egypt, 2014.

HELENE, P. R. L. **Manual para Reparo, Reforço, e proteção de Estruturas de Concreto**. São Paul: Pini, 1992.

HO, D.W.S.; LEWIS, R.K. Carbonation of Concrete and Its. **Pergamon Journals**. Prediction Cement and Concrete Research. V. 17, p. 489 – 504, n. 3, Melbourne, 1987.

HOLLOWAY, L. C.; LEEMING, M. B. **Strengthening of Reinforced Concrete Structures**. Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering. CRC Press. Cambridge England, 2000. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=BLClAgAAQBAJ&pg=PA15&lpg=PA15&dq=strengthening+structures+methods+a+review&source=bl&ots=kPfukcS6-p&sig=VQkGTTPC4wp6zzvnNzF9kVFe_mU&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwj05r75-KTKAhVBj5AKHVCzADo4ChDoAQhMMAk#v=onepage&q=strengthening%20structures%20methods%20a%20review&f=true. Acesso em: 02/02/2016.

HOLLOWAY, L. C. The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure. **Construction and Building Materials**, n.17, p. 365-378, 2003.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 1-88, 2012.

ISAIA, G. A. **A Corrosão das Armaduras nas Estruturas de Concreto Armado em Edificações da Primeira Metade do Século XX: Uma metodologia de avaliação para sua Detecção**. Dissertação (Mestrado em Patrimônio cultural) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

IZQUIERDO, I. S. **Uso de Fibra Natural de Sisal em Blocos de Concreto Para Alvenaria Estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

JONES, R.; SWAMY, R. N.; CHARIF, A. Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates. **The Structural Enginnering**, London, v. 66, n. 5, p. 85-94, 1988.

LASANTHA. **Patologia da Construção Civil**. 2012. Disponível em: <http://patologiadaconstrucao.blogspot.com.br/2012/09/reparo-reforco-e-recuperacao-de->

concreto.html. Acessado em: 07/02/2016.

LEITÃO, E. S. **Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Bobinados em Diversas Orientações do Reforço**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

LIMA, B. S.; LENZ, D. M.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Influência da Fibra de Curauá em Compósitos Cimentícios: Verificação da Resistência à Flexão e da Resistência à Compressão. **Revista de Iniciação Científica da ULBRA**, 2011.

LUKKASSEN, D.; MEIDELL, A. **Advanced Materials and Structures and Their Fabrication Processes**. Narvik University College: HiN, 2007.

L’Hermite, R.; Bresson, J. Concrete reinforced with glued plates, In: RILEM International Symposium, **Synthetic resins in building construction**, pp. 175 – 203, Paris, 1967.

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

MACHADO, A. P. Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compósitos. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

MACHADO, A. P. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. Edição BASF, 2010.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compósitos PRF: Teoria e Prática**. São Paulo: PINI, 2015.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução à Polímeros**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

MASUELLI, M. A. **Fiber Reinforced Polymers – The Technology Applied for Concrete Repair**. San Luiz: CC BY, 2013.

MASUELLI, M. A. **Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes**. Intech Open Science, 2013. Disponível em: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/41941.pdf>. Acessado em: 06/03/2016.

MATHER, R.R.; WARDMAN, R.H. **The Chemistry of Textile fibres**. Cambridge: RSC Publishing, 2011.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engineering and science**. London: Chapman & Hall, 1999.

MBRACE; “**Guia de diseño estructural**”, Barcelona, España, 1999.

MENEGHETTI, L. C. **Análise do Comportamento à Fadiga de Vigas de Concreto Armado Reforçadas Com PRF de Vidro, Carbono e Aramida.** Tese (doutorado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

MENEGHETTI, L. C.; DA SILVA FILHO, L. C. P.; GARCEZ, M. R. Verificação da Possibilidade de Variações das Fibras Formadoras do Compósito nos sistemas PFR Aplicados no Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado. **Revista Ciência & Engenharia**, Porto Alegre, v. 16, n. 1/2 p. 107 – 114, 2007.

MENON, N. V.; PADARATZ, I. J. Desempenho de duas técnicas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado através de inserção de laminado de CFRP. **Revista Tecnológica**, v. 17, p. 19-28, 2008.

MILANESE, A. C. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibra de sisal e de vidro.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fibres, Biopolymers and Biocomposites.** Boca Raton: CRC Press, 2005.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; FERREIRA, A. S.; NASCIMENTO, D. C. O. Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly. **Journal of Minerals, Metals and Materials Society**, v. 61, n. 1, p. 17-22, 2009.

MOTTA, L. A. C.; AGOPYAN, V. Caracterização de Fibras Curtas Empregadas na Construção Civil. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2007.

MBT - **Master Builders Technologies.** MBrace TM Composite Strengthening System - Engineering Design Guidelines, 2004.

MWAIKAMBO, L. Y. and ANSELL, M. P. Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. I. hemp fibres. **Journal of Materials Science**, v. 41, p. 2483-2496, 2006.

MWAIKAMBO, L. Y. Review of History, Properties and Application of Plant Fibres. **African Journal of Science and Technology (AJST)**, Science and Engineering Series, v. 7, nº 2, pp. 120-133, 2006.

NAVARRO, C. I. T. *et al.* **Caracterização Microestrutural das Fibras Naturais: Etlingera elatior, Costus, Helicônia bihai.** Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

NORDIN, H. **Strengthening structures with externally prestressed tendons.** Literature review. Luleå University of Technology, Technical Report, Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering, Luleå, 2005.

OLAJUMOKE, A. M.; DUNDU, M. Methods for flexural strengthening of reinforced concrete elements using steel plates. **Construction Materials and Structures**, University

of Johannesburg, Department of Civil Engineering Science, 2014. Disponível em: <https://ujdigispace.uj.ac.za/bitstream/handle/10210/13649/Methods%20for%20flexural%20strengthening.pdf?sequence=1>. Acesso em: 01/02/2016.

PEREIRA, F. S. C. Avaliação de Concretos Reforçados por Confinamento com Manta de Fibra de Vidro Estrutural e Pré-Impregnada. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal- RN, 2009.

PEREIRA, P. H. F.; ROSA, M. F.; CIOFFI M. O. H.; BENINI K. C. C. C.; MILANESE A. C.; VOORWALD H. J. C.; MULINARI D. R. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. **Polímeros**, v.25 n.1 São Carlos, 2015.

PIANCHELLI, E. M. Patologia e terapia das estruturas – Reforço com concreto. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

PICANÇO, M. S. Compósito Cimentícios Reforçados Com Fibras de Curauá. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PIVATTO, A. B. Reforço Estrutural à Flexão para Viga Biapoiada de Concreto Armado por Chapas Metálicas e Compósito Reforçado com Fibras de Carbono. Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PONCIANO, C. A.; VIEIRA, J. G.; MOTTA, L. A. C.; OLIVEIRA, W. J. Estudo do uso da terra diatomácea residual como pozolana para incremento da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de sisal. **IV Encontro nacional sobre aproveitamento de resíduos na construção civil**, Enarc, 2015.

RIBEIRO, T. A. S. Análise da ligação com filme termo-adesivo ou resina epóxi do reforço à flexão de PRFC em vigas de concreto armado com variação de temperatura utilizando confiabilidade estrutural. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

REIS, A. P. A. Reforço de Vigas de Concreto Armado por Meio de Barras de Aço Adicionais ou Chapas de Aço e Argamassa de Alto Desempenho. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

RIPPER, T. Plásticos Armados com Fibras como Solução para o Reforço de Estruturas. Seminário sobre Estruturas Reforçadas com Fibras - UFF, Niterói, Rio de Janeiro, 1998.

RIPPER, T., SCHERER, J. Avaliação do Desempenho de Plásticos Armados com Folhas Unidirecionais de Fibras de Carbono como Elemento de Reforço de Vigas de Betão Armado. In: **Anais do 41º Congresso Brasileiro do Concreto**, Salvador, Bahia, 1999.

ROMERO, Diana Valeria Schwenk. Reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio de protensão externa. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, A. C. **Ensaio para Análise da Interface Entre o Concreto e Polímero Reforçado com Fibra.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SANTOS, Euler Wagner Freitas. **Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, K.F.; MOTTA, L. A. C. ; SOARES, I. M. ; CUNHA, J. ; SOUZA, C. R. ; dos SANTOS, A.C. Análise Experimental E Numérica Do Comportamento Mecânico De Compósitos De Matriz Epóxi Reforçada Com Fibras Rami Para Reforço De Estruturas De Concreto. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió. **54º Congresso Brasileiro do Concreto.** São Paulo: IBRACON, 2012. p. 1-10.

SANTOS, M. R. G. **Deterioracao das Estruturas de Concreto Armado – Estudo de Caso.** Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SANTOS, M. S. **Adequação Estrutural dos Pilares de um Edifício Residencial em Concreto Armado na Cidade de Rio Branco.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

SATYANARAYANA, K.G.; WYPYCH, F.; GUIMARÃES, J.L.; AMICO, C.S.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; RAMOS, L.P. Studies on natural fibers of Brazil and green composites. **Metals Materials Processes.** v. 17(3-4), p. 183-194, 2005.

SILVA, A. O. B. da. **Reforço à flexão em vigas de concreto de alta resistência à compressão através da colagem externa de mantas flexíveis de fibras de carbono (PRFC).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SILVA, M. R.; PINHEIRO, S. M. M. **Biodeterioração do concreto.** In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.* v. 2, cap. 28, p. 857- 878. São Paulo: IBRACON, 2005.

SILVA, E. A. **Técnicas de Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado.** Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2006.

SILVA FILHO, L.C.P; GARCEZ, M.R. Compósitos de Engenharia de Matriz Polimérica. In ISAIA, G.C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, p. 1423-1464, 2007.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova,** v.32 no.3. São Paulo, 2009.

SILVA SOUZA, A. F. V. **Reparação, Reabilitação e Reforço de Estruturas de Betão Armado.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

SILVA, A. P. O.; QUARESMA, S. C.; MOTTA, L. A. C., FRANCKLIN, H. M. Estudo das propriedades mecânicas de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de sisal para reforço de estruturas de concreto. In: **13º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Natal, 2015

SIMÕES, M. **Reforço de vigas de concreto armado por encamisamento parcial**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Março, 2007.

SOARES, I. M. **Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

SOUZA, C. R., CUNHA, J. Análise Teórica E Numérica Do Comportamento Mecânico De Compostos Epóxi/Fibras Vegetais Visando Reforço Estrutural. **Revista Eletrônica Horizonte Científico**, UFU, vol. 5, N° 2, p. 1-18, 2011.

SOUZA, L. K. **Produção e Caracterização Mecânica de Compósitos de Resina Poliuretana à Base de Óleo de Mamona e Fibras de Rami, Sisal e Bucha Vegetal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SMOLE, M. S.; HRIBERNIK, S.; KLEINSCHEK, K. S.; KREŽE T. **Plant Fibres for Textile and Technical Applications**. Slovenia: University of Maribor, 2005.

STRONG, A. B. **Composites Manufacturing – Materials, Methods, and Applications**, 2 ed. Dearborn – Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2008.

TAJ, S; KHAN, S.; MUNAWAR, M. A. Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites. **Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences**, Lahore, v. 44, p. 129-144, 2007.

TAKEUTI, A. R. **Reforço de Pilares de Concreto Armado por Meio de Encamisamento com Concreto de Alto Desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 1999.

TAYLOR, G. **Materials in Construction**. London: Logman Scientific & Technical, 1994.

TECHNE. **Reforço de estruturas de concreto com fibras de carbono**. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285695-1.aspx>. Acesso em: 02/02/2016.

TENG, J. G.; CHEN, J. F.; SMITH, S. T.; LAM, L. **FRP Strengthened RC Structure**. England: John e Wiley e Sons, 2002.

TENG, J.G.; CHEN J.F.; SMITH, S.T.; LAM, L. **FRP strengthened RC structures**. London: John Wiley & Sons, p. 266, 2002.

TEYMOURIAN, J.; MOINFAR, A.A. and NADERZADEH, A. Strengthening Of Existing Buildings Against Earthquake With Consideration Of Economic Constraints In Developing Countries. **13th World Conference on Earthquake Engineering**, Canada, Paper No. 2283, 2004.

TIMERMAN, J. Reabilitação e reforço de estruturas de concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011.

TITA, S. P. S. **Efeito dos tratamentos de superfície das fibras de bagaço de cana-de-açucar e sisal nas propriedades de compósitos de matriz fenólica e lignofenólicas**. Dissertação (mestrado), Instituto de Química de São Carlos /IQSC/, USP, São Carlos, 2002.

TOLEDO F, R. D. **Natural fibre reinforced mortar composites: Experimental characterization**. Rio de Janeiro: DEC-PUC/Imperial College, London: DEC, Ph.D. Thesis. 1997.

TONG, L.; MOURITZ, A. P.; BANNISTER, M. **3D Fibre Reinforced Polymer Composites**. Oxford: Elsevier, 2002.

TRIANTAFILLOU, T. C.; PLEVRISS, N. Strengthening Of Rc Beams With Epoxy-Bounded Fibre-Composite Materials. **Materials and Structures**, v. 25, pp. 201-211, 1992.

VIEIRA, M. C. S.; CUNHA, J. Análise Numérica do Comportamento Estrutural de Lajes de Concreto Reforçadas Com Compósitos Epóxi/Fibras Vegetais. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v.6, n.2, 2012.

WAMBUA, P.; IVENS, I.; VERPOEST, I. Natural fibers: can they replace glass and fibre reinforced plastics. **Composites Science and Technology**, v. 63, n.9, p. 1259-1264, 2003.

WOODSON, R. D. **Concrete Structures: Protection, Repair and Rehabilitation**. Oxford, 2009.

ZAMIN, B. M.; JUMAAT; ASHRAFUL, B. A. **Strengthening of Reinforced Concrete Structures**. Jarutera, 2007.

ZHISHEN W.; XIN W.; KENTARO I. "State-of-the-Art of Advanced FRP Applications in Civil Infrastructure in Japan". **Composites & Polycon 2007**, Tampa, p. 17-19, 2007.