

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

TIAGO TEIXEIRA DA SILVA BRAGA

**Reforço Estrutural de Vigas de Concreto Armado com Compósito de Fibra de Carbono e
Resina Epóxi**

Guaratinguetá
2019

Tiago Teixeira da Silva Braga

Reforço Estrutural de Vigas de Concreto Armado com Compósito de Fibra de Carbono e Resina Epóxi

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Daniel Cónsoli Silveira
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Márcia Regina de Freitas

Guaratinguetá
2019

B813r	<p>Braga, Tiago Teixeira da Silva</p> <p>Reforço estrutural de vigas de concreto armado com compósito de fibra de carbono e resina epóxi / Tiago Teixeira da Silva Braga – Guaratinguetá, 2019.</p> <p>71 f. : il.</p> <p>Bibliografia : f. 68-71</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.</p> <p>Orientador: Me. Daniel Cônsoli Silveira</p> <p>Co-orientadora: Profª. Drª. Márcia Regina de Freitas</p> <p>1. Compósitos poliméricos. 2. Materiais compostos. 3. Resinas epóxi</p> <p>I. Título.</p> <p>CDU 620.1</p>
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

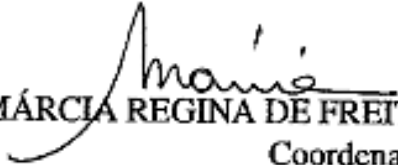
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

TIAGO TEIXEIRA DA SILVA BRAGA

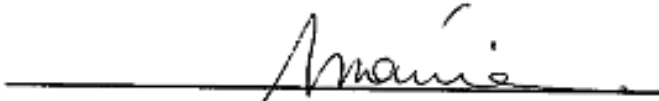
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE

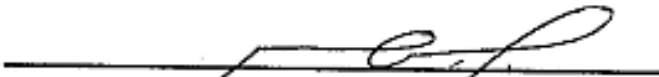
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

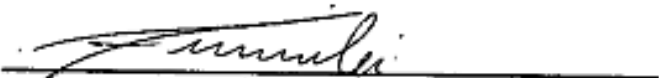
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


Profª Drª. MÁRCIA REGINA DE FREITAS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Profª Drª. Márcia Regina de Freitas
Coordenadora/UNESP-FEG


Profº Dr. Edson Cocchieri Botelho
UNESP-FEG


Profº Ms. Francisco Maciel Monticeli
UNESP-FEG

Novembro, 2019

DADOS CURRICULARES

TIAGO TEIXEIRA DA SILVA BRAGA

NASCIMENTO 03/06/1997 - Suzano / SP

FILIAÇÃO Edson Marcos Silva Braga
Teresinha Teixeira da Silva Braga

2015 / 2019 Bacharelado em Engenharia Civil
Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho" (UNESP)

Dedico este trabalho a meus pais, meu irmão e toda minha família, que sempre me apoiaram e
contribuíram com minha formação.

AGRADECIMENTOS

A minha família por todo o incentivo e apoio em todas as fases da vida, permitindo que eu chegasse onde estou e me tornasse quem sou.

Aos meus amigos que permaneceram sempre ao meu lado, compartilhando momentos bons e ruins, apoiando nos momentos difíceis e sempre tornando tudo mais leve nessa dura jornada.

Ao meu orientador neste Trabalho de Graduação e de Pesquisa, Prof. Ms. Daniel Cônsoli Silveira, pela amizade, por todo o conhecimento compartilhado e auxílio prestado durante nossos 3 anos de parceria, sempre me incentivando à excelência.

Ao meu orientador de Pesquisa, Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho, pela orientação em nossos projetos de Iniciação Tecnológica e apoio técnico e pessoal na realização deste projeto.

Ao Núcleo Interdisciplinar de Compósitos Avançados (INAC) pelo acolhimento e por todo apoio técnico durante a realização deste e de outros projetos.

À Prof. Dr. Michelle Leali Costa, à *Embraer S/A* e à *Alltec* pela doação de material para fabricação do material compósito utilizado neste projeto.

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Ancelotti Junior e ao Núcleo de Tecnologia em Compósitos (NTC) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo auxílio para a realização de ensaios em suas dependências.

Ao Mestrando Luís Barbosa Marques pela ajuda na realização de ensaios de flexão, essenciais para a obtenção dos resultados deste trabalho.

Aos técnicos Flávio Augusto Bernardes da Silva e Odir Vieira da Silva pelo apoio na preparação de corpos de prova de concreto armado e no corte e ajuste de medidas dos corpos de prova de compósito.

Ao supervisor de vendas Alex Martins e à *Viapol Ltda.* pela doação do fundo preparador *Viapol Carbon Primer*, essencial para a execução deste projeto e muito importante para a obtenção dos melhores resultados possíveis.

Aos Departamentos de Engenharia Civil (DEC) e Materiais e Tecnologia (DMT) e todos seus professores e servidores, pelo apoio técnico, disponibilidade e por todo o conhecimento passado a mim ao longo destes 5 anos.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou
sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)*

RESUMO

Durante a vida útil de uma estrutura de concreto armado, ela está sujeita a fatores como erros de projeto e de execução, falta de manutenção e acréscimos de cargas, que podem causar patologias estruturais, necessitando então de reforços para que se mantenha a integridade da estrutura em questão. Este projeto apresenta uma técnica de reforço estrutural utilizando um compósito polimérico estrutural produzido com fibra de carbono e resina epóxi. Com a fabricação do compósito através da laminação de pré-impregnados de fibra de carbono e processo de cura com moldagem por compressão à quente, é proposto um sistema de reforço para a recuperação de vigas de concreto armado, ampliando suas propriedades mecânicas, em qualquer etapa de sua vida útil. Através da produção de vigas de concreto armado e da adesão do compósito a tais vigas, é possível determinar o acréscimo de carga proporcionado pelo sistema a partir da comparação de dados obtidos de ensaio de flexão de vigas com e sem o reforço polimérico. Com isso foi possível determinar a eficiência do sistema e também verificar a precisão dos métodos de cálculos propostos na literatura. O sistema de reforço produzido promoveu um acréscimo na resistência de vigas de concreto armado de 146,62 %. Em comparação com resultados obtidos em projeto anterior, utilizando um reforço compósito de resina epóxi e fibra de vidro, o novo sistema proposto neste trabalho apresentou um acréscimo de 32,15 % na resistência de vigas em relação ao sistema anterior, apesar do compósito de fibra de carbono ter apresentado resultados 413,40 % maiores que o compósito de fibra de Vidro. Em relação aos valores de referência teóricos, as vigas de concreto armado sem reforço obtiveram resultados experimentais 13,43 % maiores que o teórico, enquanto as vigas reforçadas alcançaram uma resistência 33,96 % maior que o valor de referência. Dessa forma, foi comprovada a eficiência do sistema de reforço e também constatada a segurança e conservadorismo dos métodos de cálculos utilizados.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito Estrutural. Polímero Reforçado com Fibra de Carbono. Polímero Termorrígido. Vigas Reforçadas.

ABSTRACT

Factors such as design and execution errors, lack of maintenance and increased loads, can cause pathologies in reinforced concrete structures, requiring reinforcements to maintain the integrity of the structure. This project presents a structural reinforcement technique using a polymeric structural composite obtained with carbon fiber fabric and epoxy resin. Through the fabrication of the composite, with the lamination of carbon fiber preregs and the hot compression molding curing process, is proposed a reinforcement system for the recovery of reinforced concrete beams subjected to loads higher than those considered in sizing. Through the production of reinforced concrete beams and the adhesion of the composite to such beams, it is possible to determine the load increase provided by the system by comparing data obtained from bending flexural tests with and without the polymeric composite reinforcement. Therefore, it was possible to determine the efficiency of the system and also verify the accuracy of the calculation methods proposed in the literature. The reinforcement system promoted an increase in the strength of reinforced concrete beams of 146.62 %. Compared to results obtained in a previous project, using a composite reinforcement of epoxy resin and fiberglass, the new system proposed in this work presented an increase of 32.15 % in the strength of beams in relation to the previous system, despite the carbon fiber presenting results 413.40 % higher than the fiberglass composite. Regarding the theoretical reference values, the reinforced concrete beams obtained experimental results were 13.43 % higher than the theoretical ones, while the reinforced beams reached a resistance 33.96 % greater than the reference value. Thus, the efficiency of the reinforcement system was confirmed, and the safety and conservatism of the calculation methods used was verified.

KEYWORDS: Structural Composite. Carbon Fiber Reinforced Polymer. Thermosetting Polymer. Reinforced Beams.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1	Granulometria de Agregados	20
Figura 1	Principais Causas de Patologias	23
Figura 2	Fissuras por Retração	24
Figura 3	Fissuras por Dilatação Térmica	24
Figura 4	Fissuras por Flexão, Cisalhamento e Compressão	25
Figura 5	Fissuras por Torção e Punção	25
Figura 6	Corrosão da Armadura	25
Figura 7	Classificação dos Compósitos	26
Quadro 2	Características dos Polímeros	27
Figura 8	Configurações de Reforço	28
Figura 9	Tipos de Tecidos	29
Figura 10	Reforço com Aumento da Seção	30
Figura 11	Reforço com Perfil Metálico	31
Figura 12	Reforço com Manta de Fibra de Carbono	32
Quadro 3	Vantagens e Desvantagens dos Tipos de Reforços	33
Figura 13	Fluxograma de Atividades	35
Figura 14	Aglomerante e Agregados	36
Figura 15	Armadura	37
Figura 16	Preparador de Superfície	38
Figura 17	Adesivo Estrutural	38
Figura 18	Especificações da NBR 12142:2010	39
Figura 19	Corpo de Prova de Concreto Armado	39
Figura 20	Corpo de Prova de Compósito	40
Figura 21	Corpo de Prova Híbrido	40
Figura 22	Forma	40
Figura 23	Corpo de Prova Prismáticos	41
Figura 24	Corpo de Prova Cilíndricos	41
Figura 25	Laminação em Molde de Aço	42
Figura 26	Prensa Hidráulica	42
Figura 27	Ciclo de Cura	43
Figura 28	Ultrassom	43
Figura 29	Serra de Fita	44
Figura 30	Fresa	44
Figura 31	Corpos de Prova de Compósito	45
Figura 32	Corpos de Provas de Concreto Armado Secos	45
Figura 33	Aplicação do Primer	46

Figura 34	Textura Adesiva (<i>tack</i>)	46
Figura 35	Aplicação do Adesivo	47
Figura 36	Colagem do Compósito	47
Figura 37	Máquina de Ensaio de Compressão	48
Figura 38	Diagrama Tensão x Deformação do Concreto	49
Figura 39	Diagrama Tensão x Deformação do Aço	49
Figura 40	Definições do Dimensionamento do Concreto Armado	50
Figura 41	Visualização dos Domínios	50
Figura 42	Definições do Dimensionamento do Compósito	52
Figura 43	Condições de Cargas e Apoios	52
Figura 44	Máquina de Ensaio Universal	53
Quadro 4	Numeração dos Corpos de Prova	53
Figura 45	Placa moldada sem emendas laterais	54
Figura 46	Placa moldada com emendas laterais	55
Figura 47	Corpos de Prova Cilíndricos	56
Figura 48	Corpos de Prova Cilíndricos Rompidos	56
Figura 49	Gráfico Tensão x Deformação - CDPs Prismáticos de CA	59
Figura 50	Gráfico Tensão x Deformação - CDPs Prismáticos de Compósito	60
Figura 51	Gráfico Tensão x Deformação - CDPs Prismáticos Híbridos	61
Figura 52	Modelos de Ruptura	62
Figura 53	Fissuração dos CDPs de Concreto Armado	63
Figura 54	Fissuração dos CDPs Híbridos	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de Cimentos Portland	20
Tabela 2 – Fibras e suas Propriedades	29
Tabela 3 – Dosagem	36
Tabela 4 – Cargas e Tensões Máximas - CDPs Cilíndricos	56
Tabela 5 – Dimensionamento da Viga de CA	57
Tabela 6 – Cargas e Tensões Máximas - CDPs Prismáticos de CA	58
Tabela 7 – Cargas e Tensões Máximas - CDPs Prismáticos de Compósito	60
Tabela 8 – Cargas e Tensões Máximas - CDPs Prismáticos Híbridos	61
Tabela 9 – Comparação - CDPs Prismáticos de CA e Híbridos	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Armado
CDP	Corpo de Prova
CDPs	Corpos de Prova
CG	Centro de Gravidade
CP	Cimento Portland
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DMT	Departamento de Materiais e Tecnologia
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
LN	Linha Neutra
MME	Ministério de Minas e Energia
NB	Norma de Procedimento
NBR	Norma Brasileira
NTC	Núcleo de Tecnologia em Compósitos
PRF	Polímero Reforçado com Fibra
PRFC	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{ck}	Resistência à compressão característica do concreto
K_X	Coefficiente de cálculo
x	Distância da LN à fibra mais comprimida de concreto
d	Distância do CG da armadura à fibra mais comprimida do concreto
ϵ_C	Deformação específica do concreto
ϵ_S	Deformação específica do aço da armadura longitudinal
K_C	Coefficiente de cálculo
M_d	Momento fletor de cálculo
b_W	Largura nominal da seção transversal do corpo de prova
f_{cd}	Resistência à compressão de cálculo do concreto
K_S	Coefficiente de cálculo
A_S	Área da seção transversal da armadura longitudinal
f_{yd}	Resistência ao escoamento de cálculo do aço
y	Altura do diagrama retangular simplificado
A_f	Área do reforço
f_f	Resistência admissível do reforço
d_f	Distância do CG do reforço à fibra mais comprimida do concreto
f_{yk}	Resistência ao escoamento característica do aço
ϕ_S	Diâmetro do aço da armadura
$F_{k,max}$	Carga característica máxima
l	Distância entre os apoios de ensaio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	19
3.1.1	Componentes	19
3.1.2	Principais Vantagens e Desvantagens	21
3.1.3	Normatização	22
3.2	PATOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	22
3.2.1	Causas Patológicas	22
3.2.2	Principais Patologias Estruturais	24
3.3	MATERIAIS COMPÓSITOS	26
3.3.1	Matrizes	26
3.3.2	Fases Dispersas	27
3.4	REFORÇOS EM ESTRUTURAS	30
3.4.1	Técnicas de Reforços	30
3.4.2	Inovações em Reforços com PRF	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	35
4.2	MATERIAIS	36
4.2.1	Concreto Armado	36
4.2.2	Polímero Reforçado com Fibras	37
4.2.3	Interface	37
4.3	MÉTODOS	38
4.3.1	Dimensionamento Experimental	38
4.3.2	Fabricação das Peças de Concreto Armado	40
4.3.3	Fabricação e Inspeção do Reforço Compósito	42
4.3.4	Interface entre Reforço e Substrato	45
4.3.5	Ensaio de Compressão	47
4.3.6	Dimensionamento Teórico	48

4.3.7	Ensaaios de Flexão	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1	INSPEÇÃO DO REFORÇO DE COMPÓSITO	54
5.2	ENSAIOS DE COMPRESSÃO	55
5.3	DIMENSIONAMENTO TEÓRICO	57
5.4	ENSAIOS DE FLEXÃO	58
5.4.1	Vigas de Concreto Armado	58
5.4.2	Vigas de Compósito	59
5.4.3	Vigas Híbridas	60
5.5	ANÁLISE DE FISSURAÇÃO	62
5.5.1	Vigas de Concreto Armado	62
5.5.2	Vigas Híbridas	63
5.6	COMPARAÇÃO ENTRE VIGAS COM E SEM REFORÇO DE PRF	64
5.7	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS ANTERIORES	65
6	CONCLUSÕES	66
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Estudos sobre patologias estruturais tem como objetivo determinar suas origens e consequências ao elemento em que ocorrem, para que, através da mitigação, seja garantido um desempenho satisfatório das estruturas (SOUZA; RIPPER, 1998).

As consequências de erros realizados na concepção de projeto normalmente só serão observadas após muitos anos de utilização, dificultando seu diagnóstico e aumentando a complexidade de eventuais reparos. As principais patologias observadas nos elementos degradados são: fissuras, de inúmeros tipos, corrosão da armadura e desagregação do concreto (GONÇALVES, 2015).

Após a detecção de patologias estruturais, é necessário utilizar técnicas de reforço que permitam estabilizar a estrutura e estender a vida útil do elemento. Diversos tipos de técnicas podem ser aplicadas, de acordo com o tipo de patologia e o sistema construtivo utilizado. As principais técnicas se baseiam no aumento das seções transversais dos elementos degradados, com a adição de materiais como o próprio concreto, metais ou compósitos poliméricos reforçados com fibras (ZUCCHI, 2015; SOUZA; RIPPER, 1998).

As principais soluções relacionadas aos compósitos poliméricos reforçados com fibra utilizam materiais como fibra de vidro, carbono e poliaramida, junto a resinas, como a epóxi, fenólica, poliéster, entre outras. O sistema usufrui de uma baixa massa específica, do polímero, com alta resistência e rigidez, do reforço de fibra (ZUCCHI, 2015).

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

Esta monografia está organizada em 5 capítulos, incluindo o Capítulo 1, uma breve introdução, com apresentação das justificativas do presente trabalho e esta explicação da estrutura do texto. A seguir uma breve descrição dos próximos capítulos.

No Capítulo 2 são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos propostos neste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica, onde serão definidos os principais conceitos envolvidos neste trabalho, as estruturas civis construídas em concreto armado, as patologias apresentadas em tais estruturas, os materiais compósitos e a sua aplicação no reforço de estruturas e tratamento de patologias estruturais.

No Capítulo 4 são apresentados todos os materiais utilizados na produção deste trabalho, como na produção de corpos de prova de concreto armado, de compósito e na união entre estes elementos, além de detalhes sobre todos os procedimentos experimentais realizados, como o dimensionamento dos elementos, a concretagem dos corpos de prova, a moldagem e inspeção do compósito, o corte e ajuste de medidas, a interface entre os elementos, a caracterização quanto a

resistência a compressão dos elementos cilíndricos, a obtenção de valores teóricos de referência e a caracterização quanto a resistência a flexão dos elementos prismáticos.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos dos procedimentos experimentais, e suas respectivas conclusões. Serão analisados os resultados obtidos de: inspeção por ultrassom do compósito, ensaio de compressão dos corpos de prova cilíndricos, valores teóricos de referência, ensaio de flexão em vigas de concreto armado, de compósito e híbridas, comparação entre a fissuras das peças com e sem reforço e comparações com resultados obtidos em trabalhos prévios.

O Capítulo 6 tem como objetivo apresentar as conclusões obtidas da realização deste trabalho, fazendo uma síntese dos procedimentos, reiterando os principais resultados obtidos e defendendo as contribuições deste trabalho para o campo de Engenharia Civil.

Em sequência, são apresentadas todas as produções bibliográficas utilizadas para a realização deste trabalho, como artigos, monografias, dissertações, teses e normas técnicas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar o processamento de material compósito baseado em resina epóxi e tecido de fibra de carbono e avaliar a sua aplicação como reforço estrutural em peças horizontais de concreto armado, através do ganho de resistência a flexão obtido da adesão deste compósito.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparação de resultados de ensaios de flexão de vigas com e sem o reforço para determinação do acréscimo percentual na capacidade de carga gerado pela adição do reforço;
- Análise de fissuração para determinação das mudanças no mecanismo de falha causada pela alteração na transmissão dos esforços de tração causada pela flexão da peça;
- Comparação com compósito produzido nas mesmas condições, mas utilizando um sistema de resina epóxi e fibra de vidro de trabalho prévio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Desde o início da civilização o ser humano se preocupa com a construção de estruturas para atender suas necessidades de habitação, trabalho e infraestruturas, com desenvolvimentos contínuos de casas, edifícios residenciais e comerciais, indústrias, pontes, barragens, túneis, entre diversas outras estruturas civis que fazem parte do nosso cotidiano (BASTOS, 2006b). A contínua necessidade de adaptação levou ao crescimento acelerado do setor em todo o mundo, isso levou a inovações nas áreas de concepção de projetos, dimensionamento, análise, detalhamento, métodos construtivos e tecnologia dos materiais utilizados (AZUMA et al., 2007).

A construção civil no Brasil, de forma geral é uma indústria tradicional, muito resistente a mudanças, e considerada relativamente atrasada em relação a outros segmentos da indústria (TOMASI, 2005). No país é muito claro que o avanço em métodos construtivos caminha em passos pequenos, mas consistentes, em um ritmo constante. O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo atualmente, é obtido através do proporcionamento adequado entre 4 componentes principais: aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Podem ser adicionados aditivos também que irão conferir propriedades especiais ao concreto, como incorporadores de ar, plastificantes ou redutores de água, modificadores de pega ou de viscosidade, entre outros (BAUER, 2008).

Estruturas utilizando o sistema de concreto armado são uma parte essencial da infraestrutura da sociedade moderna em decorrência de sua introdução no país e popularização em meados do século XX (SANTOS, 2008). O concreto armado surgiu da necessidade de unir características únicas de dois materiais distintos, o concreto simples, com sua alta resistência a compressão e durabilidade, e o aço, com suas ótimas propriedades mecânicas e variedade de formatos e tamanhos. Um conceito importante relacionado a união destes elementos é a aderência, promovendo solidariedade entre os materiais, essencial para que as características de ambos sejam utilizadas ao máximo (BASTOS, 2006b).

3.1.1 Componentes

O principal aglomerante utilizado na construção civil, cimento *Portland*, foi descoberto na Inglaterra em 1824, e deste então, é extensivamente utilizado no setor. O cimento é o principal elemento do concreto e maior responsável por suas características mecânicas. É um pó fino com propriedades aglutinantes quando em contato com água composto essencialmente de clínquer (calcário e argila), gesso (sulfato de cálcio) e adições diversas. O tipo de adição presente no concreto confere propriedades especiais e nomenclatura específica. Destacam-se a escória de alto forno, pozolana e material carbonático, conforme a Tabela 1 (ABCP, 2002; BASTOS, 2006a).

Tabela 1 – Classificação de Cimentos Portland

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Gesso (%)	Escória Siderúrgica (%)	Material Pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I - S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II - E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II - Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II - F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-Forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V - ARI	Alta Resistência Inicial	95-100	-	-	0-5

Fonte: InovaCivil (2019)

Os agregados são responsáveis por 60 a 80 % da composição do concreto e podem ser subdivididos de acordo com sua granulometria, origem e peso. Denominam-se agregado miúdos aqueles de dimensões inferiores a 4,8 mm e graúdos quando possuírem dimensões superiores, e classificações específicas dentro destes grupos, como mostrado no Quadro 1. Quanto a origem, o agregado pode ser natural, quando obtido diretamente da natureza, como em rios, ou artificial, quando ocorre a trituração de rochas. E por fim, quanto ao peso, os agregados podem ser leves, normais ou pesados, em decorrência de seu peso específico, associado a rocha de origem, como basalto, gnaiss, granito, calcário, entre outros (BASTOS, 2006a; BAUER, 2008).

Quadro 1 – Granulometria de Agregados

Tipo	Diâmetro
Argila	Menor que 0,005 mm
Silte	Entre 0,005 e 0,050 mm
Areia Fina	Entre 0,050 e 0,425 mm
Areia Média	Entre 0,425 e 2,000 mm
Areia Grossa	Entre 2,0 e 4,8 mm
Brita 0	Entre 4,8 e 9,5 mm
Brita 1	Entre 9,5 e 19,0 mm
Brita 2	Entre 19 e 25 mm
Brita 3	Entre 25 e 38 mm
Brita 4	Entre 38 e 76 mm
Brita 5	Entre 76 e 100 mm

Fonte: Adaptado de MME (2009) e ABNT (1995)

A água é responsável por causar as reações químicas de hidratação que possibilitam a consolidação dos demais elementos em um único material monolítico, garantindo a resistência e durabilidade do concreto. Além disso, a água também é responsável pela lubrificação dos demais

componentes, conferindo maior trabalhabilidade à mistura. A relação entre água e cimento afeta diretamente sua resistência, devendo ser definida previamente na dosagem e seguida durante o processo de preparação do concreto (GONÇALVES, 2015).

O aço, na forma de armadura, é o componente que torna o concreto simples em concreto armado. O aço é preparado a partir de uma liga de ferro e carbono, normalmente o último em teor de até 0,5 % em aços utilizados na construção civil. A sua tensão de escoamento, considerada nos dimensionamentos é muito bem definida para cada tipo de aço, denominado CA-XX, geralmente são utilizados os aços CA-25, CA-50 e CA-60, que possuem tensão de escoamento, 250, 500 e 600 MPa, respectivamente. Os dois primeiros, CA-25 e CA-50, são preparados por laminação a quente, enquanto o CA-60 é encruado a frio, determinando sua alta resistência (GONÇALVES, 2015; FREITAS, 1997).

3.1.2 Principais Vantagens e Desvantagens

Segundo Clímaco (2008), as principais vantagens do concreto armado são:

- Adaptabilidade as diversas formas, devido à possibilidade de ser moldado em diversos materiais e formatos, ser aplicado em estado semifluido e a possibilidade de adição de plastificantes e fluidificantes;
- Facilidade e rapidez com o uso de peças pré moldadas e técnicas avançadas de fôrmas e escoramentos;
- Durabilidade, quando atendido os requisitos normativos, requer baixa manutenção em situações normais de uso, em ambientes não agressivos;
- Resistência à choques, vibrações e altas temperaturas;
- Resistência à compressão crescente;
- Variações como concretos de alta resistência e desempenho com a adição de materiais especiais, como a sílica ativa ou microsílica;

E entre as desvantagens estão:

- Peso próprio elevado, associado principalmente ao tipo de agregado usualmente utilizado;
- Fissuração devido à baixa resistência a tração;
- Consumo de fôrmas e escoramentos, devido aos métodos tradicionais de execução;
- Adaptações posteriores à execução necessitam de estudo aprofundado e medidas de segurança, como reforços;
- Interação com o meio: em ambientes agressivos são necessárias considerações especiais de utilização e dimensionamento.

3.1.3 Normatização

As principais normas que regem a utilização do concreto no Brasil foram definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, a ABNT, criando diretrizes para o correto projeto e execução de estruturas de concreto. Entre as principais normas que devem ser observadas estão (CLÍMACO, 2008; GONÇALVES, 2015):

- NBR 6118:2014 (Versão Corrigida) (NB-1) Projeto de estruturas de concreto - procedimento;
- NBR 7187:2003 (NB-2) Projeto de pontes de concreto armado e pretendido - procedimento;
- NBR 6122:2019 Projeto e execução de fundações;
- NBR 9062:2017 (NB-949) Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado;
- NBR 12655:2015 (Versão Corrigida) (NB-1418) Preparo, controle e recebimento de concreto;
- NBR 14931:2004 Execução de estruturas de concreto - procedimento;
- NBR 7188:2013 (NB-6) Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre.

3.2 PATOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

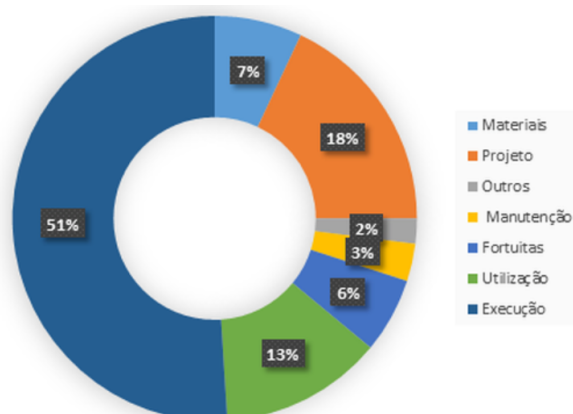
Ao longo de sua vida útil, toda e qualquer edificação está sujeita a problemas patológicos, podendo se apresentar em maior ou menor intensidade. Estudos de engenharia relacionados às patologias, suas origens, e suas consequências visam um objetivo em comum: a garantia do desempenho apropriado das estruturas, ou seja o comportamento em serviço de cada produto, resultado de cada uma das etapas dos projetos e segundo especificado, levando em consideração fatores chaves, como degradação da estrutura, por ataque físico ou químico, a utilização e vida-útil pretendida da estrutura.

3.2.1 Causas Patológicas

As manifestações patológicas podem se apresentar em três etapas da vida útil de uma construção: concepção, execução e utilização, e são causadas principalmente por falha de projeto, falha de execução, má qualidade dos materiais e má utilização pelo usuário, como ilustrado na Figura 1.

As manifestações patológicas associadas às etapas da vida útil de uma estrutura foram estudadas por Oliveira (2013) e Trindade (2015) em seus respectivos trabalhos de conclusão de curso. As manifestações patológicas na etapa de concepção estão associadas a falhas ocorridas durante estudo preliminar, execução de anteprojeto ou elaboração do projeto executivo.

Figura 1 – Principais Causas de Patologias



Fonte: AECweb (2016)

É possível elencar diversos fatores que podem levar a essas falhas, como deficiência de planejamento, falta de dados técnicos e econômicos e falta de ferramentas para controle de qualidade. Um elemento muito importante na etapa de concepção são os detalhes executivos do projeto, com isso há uma maior clareza quanto a leitura e interpretação do projeto por aqueles que irão executá-lo. Outro elemento importante é a correta especificação de materiais. Muitos problemas patológicos podem ser originados devido à má qualidade dos materiais utilizados, causando consequências à durabilidade, rigor dimensional e resistência mecânica das estruturas. Podem ser causadas patologias relacionadas a elementos estruturais inadequados, falta de compatibilização dos projetos de estrutura, arquitetura, instalações prediais e outros, especificação inadequada dos materiais, erros de dimensionamento, representações não padronizadas e falta de detalhamento de situações construtivas complexas (OLIVEIRA, 2013; TRINDADE, 2015).

Finalizada a etapa de concepção do projeto, é realizada a sua execução. Durante esta etapa, todas as diretrizes da concepção devem ser estritamente seguidas, incluindo planejamento do canteiro de obras e planejamento físico-financeiro. Para esta etapa, toda mão de obra deve ser qualificada para a execução das atividades, pois muitas patologias podem ser causadas por falta de conhecimento na utilização de equipamentos ou aplicação de materiais. Diversos problemas patológicos podem surgir nesta etapa devido a erros na implantação da obra, escoramento, fôrmas, posicionamento, quantidade e qualidade de aço e concreto. Além da mão de obra, outras possíveis causas de patologias nesta etapa são: falta de controle de qualidade, más condições de trabalho, materiais de construção de má qualidade, irresponsabilidade técnica e até mesmo sabotagem (OLIVEIRA, 2013; TRINDADE, 2015).

E por fim, após a concepção e devida execução da estrutura, a mesma também está sujeita a patologias em decorrência de sua utilização e manutenção. As patologias ocasionadas pela manutenção inadequada, ou falta de manutenção em geral, se relaciona ao desconhecimento técnico, incompetência, desleixo ou problemas financeiros daquele responsável pela estrutura. Durante esta etapa, também podem ocorrer patologias associadas à sua utilização inadequada,

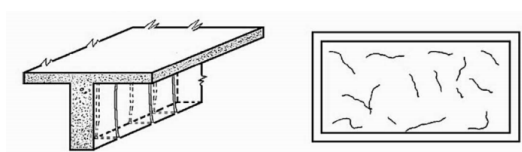
como o carregamento excessivo de estruturas não especificadas em projeto, e causas acidentais como incêndios, abalos sísmicos e impactos/choques (OLIVEIRA, 2013; TRINDADE, 2015).

3.2.2 Principais Patologias Estruturais

Entre as diversas patologias que podem afetar uma estrutura de concreto armado, destacam-se três principais, as fissuras, a corrosão das armaduras e a desagregação do concreto. As fissuras são aberturas na superfície do elemento estrutural que expõe seu interior a agentes exteriores agressivos. As fissuras podem ser causadas por diversos fatores, se manifestando de diferentes formas, em posições específicas dos elementos (GONÇALVES, 2015).

As fissuras causadas por retração hidráulica estão associadas à cura inadequada do elemento. Como o concreto não resiste a tração, a perda de água causada pelo excesso de calor de hidratação gera tensões internas que causará fissuras, demonstrado na Figura 2 (HELENE, 1992). Este problema pode ser facilmente evitado pela correta observação da cura do elemento, e corrigido através do selamento destas fissuras, protegendo a armadura (THOMAZ, 2003).

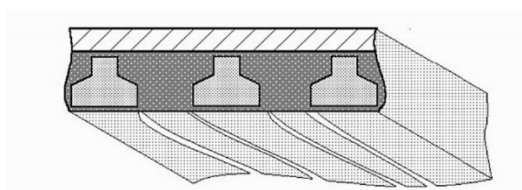
Figura 2 – Fissuras por Retração



Fonte: Souza e Ripper (1998)

Fissuras também podem ser causadas pela variação térmica do elemento, isso ocorre devido à diferença dos coeficientes de dilatação de cada um dos componentes do concreto armado, ilustrado na Figura 3. Como cada material se comporta de uma maneira, a movimentação causada pela dilatação causa fissuras e o problema é acentuado em estruturas de grandes dimensões que não tomem medidas preventivas. Este problema pode ser solucionado se for considerado durante a etapa de concepção do projeto, prevendo juntas que permitam sua movimentação (GONÇALVES, 2015; MARCELLI, 2007).

Figura 3 – Fissuras por Dilatação Térmica

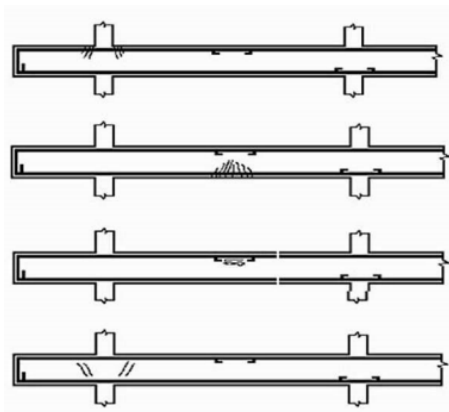


Fonte: Souza e Ripper (1998)

Erros de dimensionamento podem causar fissuras devido à flexão, cisalhamento, torção, compressão e punção no elemento, demonstradas nas Figuras 4 e 5. Com o excesso de carga, insuficiência de armadura ou erros de posicionamento, o elemento pode não transmitir as cargas

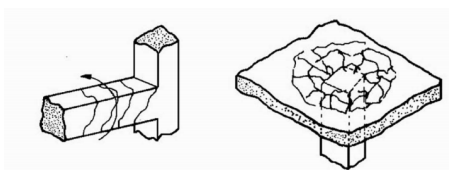
da forma esperada e manifestar essas patologias, servindo como aviso para um possível colapso da estrutura (HELENE, 1992; MARCELLI, 2007).

Figura 4 – Fissuras por Flexão, Cisalhamento e Compressão



Fonte: Souza e Ripper (1998)

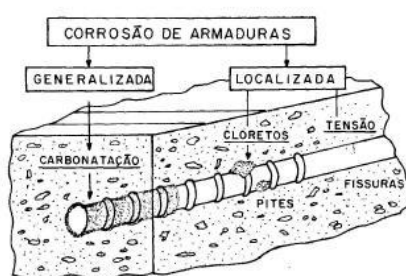
Figura 5 – Fissuras por Torção e Punção



Fonte: Souza e Ripper (1998)

A corrosão da armadura dos elementos está principalmente associada a causa anterior, fissuras. A presença de fissuras no elemento pode levar a exposição da armadura ao ambiente (MARCELLI, 2007). A corrosão é definida como a alteração do metal por meio eletroquímico devido ao contato com meio agressivo, ou seja, deterioração do aço presente na armadura, levando à diminuição da seção transversal resistente e formação de produtos de caráter expansivo, que poderão gerar tensões internas e causar novas fissuras, lascando e destacando o concreto, deixando a armadura ainda mais exposta a agentes externos (CASCUDO, 1997). A Figura 6 mostra as duas formas de corrosão que podem ocorrer, generalizada e localizada.

Figura 6 – Corrosão da Armadura



Fonte: Maidel et al. (2009)

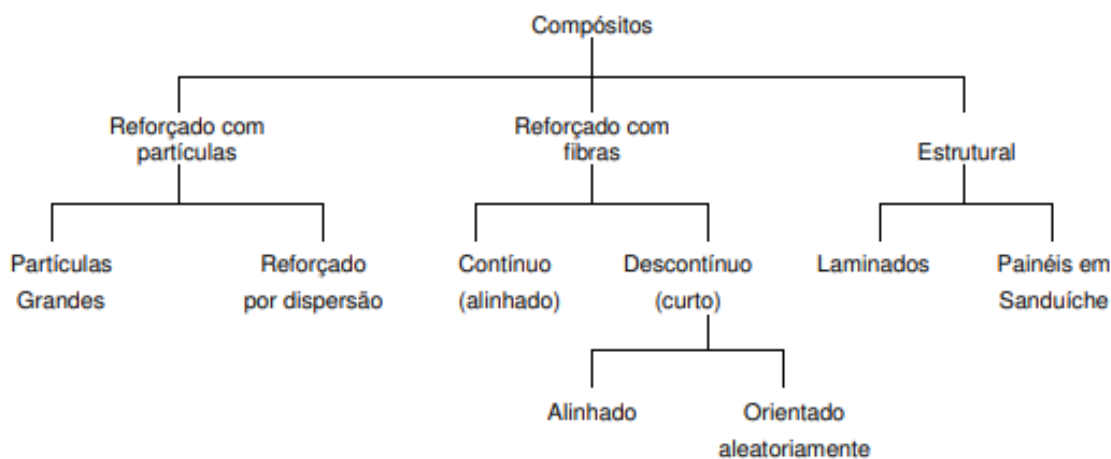
Para evitar esta situação, deve-se atentar à execução dos elementos de concreto armado, garantindo o posicionamento adequado da armadura, e tratamento adequado e ágil de fissuras.

A desagregação do concreto ocorre devido à perda de massa causado por ataque químico expansivo aliado à baixa resistência do concreto. Ou seja, erro na concepção do projeto que não considerou a agressividade do ambiente aos componentes do concreto. Por exemplo, as eflorescências são depósitos salinos causados pela reação da superfície do concreto com a água de intempéries ou infiltrações (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo a norma ASTM D3878-19, que define a terminologia padrão para materiais compósitos, estes são substâncias compostas por dois ou mais materiais, insolúveis entre si, combinados para formar um material de engenharia único, com propriedades que não podem ser obtidas dos materiais separadamente (ASTM, 2019). De forma geral, compósitos são formados por duas fases, a matriz, podendo ser ela cerâmica, metálica ou polimérica, contínua e envolvendo a outra fase, a dispersa, podendo ser partículas ou fibras. Callister (2002) propõe a seguinte classificação de compósitos ilustrada na Figura 7:

Figura 7 – Classificação dos Compósitos



Fonte: Callister (2002)

3.3.1 Matrizes

Os materiais compósitos preparados com matrizes cerâmicas, como o concreto, possuem maior resistência a temperaturas elevadas e alta dureza, próprio para aplicações estruturais. As matrizes metálicas consistem em ligas para uso em condições de altas temperaturas, condutividade e esforços mecânicos. As matrizes poliméricas se destacam pela facilidade de processamento, baixa massa específica, alta resistividade elétrica e propriedades mecânicas (CALLISTER, 2002).

Os polímeros dividem-se em termoplásticos e termorrígidos, também chamados de termofixos. Os termoplásticos são reprocessáveis, isto é, podem passar por conformação diversas vezes sem perder suas propriedades. À medida que a temperatura é elevada, o polímero ganha mobilidade e permite que assuma novos formatos, sendo consolidado com o resfriamento (MANO, 1991).

Os polímeros termorrígidos não apresentam esta propriedade. Ao ser misturado com catalisadores, o polímero é consolidado durante o processo de cura. Uma nova aplicação de temperatura e calor não irá alterar sua forma, pois se tornam insolúveis, infusíveis e não recicláveis (MANO, 1991). O Quadro 2 apresenta as principais características de cada tipo de polímero.

Quadro 2 – Características dos Polímeros

Termoplásticos	Termorrígidos
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade durante o processamento
Baixa resistência à fluência	Alta resistência a fluência
Temperatura de uso limitada, baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

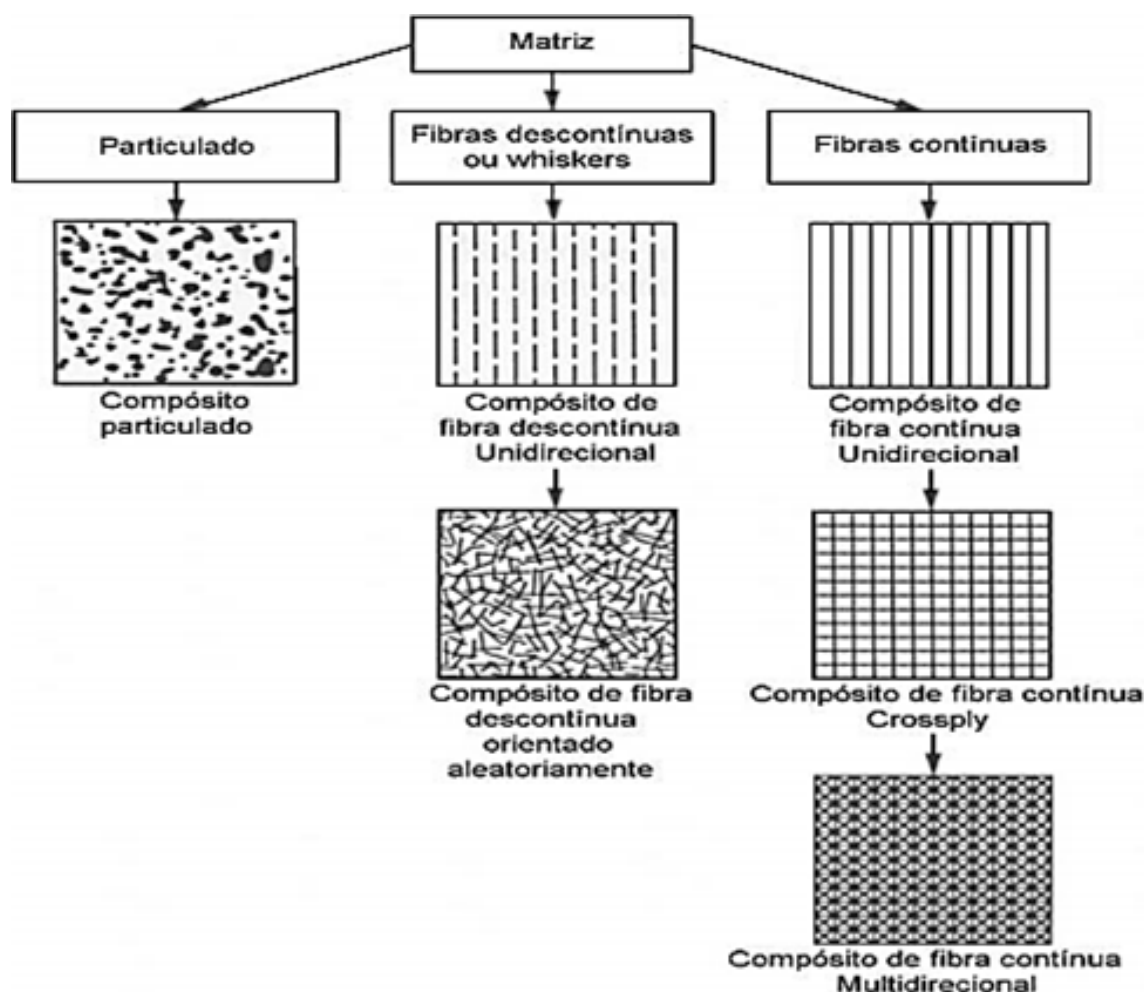
Fonte: Santos (2006)

As resinas epóxi são um exemplo de polímeros termorrígidos, são muito versáteis e apresentam excelentes propriedades mecânicas, estabilidade dimensional, resistência química, resistência a impactos, baixa absorção de água, baixa contração, alta rigidez, durabilidade e boas propriedades de adesão (MAZUMDAR, 2002). Possui também uma gama de possibilidade de processamento, podendo ser aplicada em diversas situações, inclusive como aditivo em argamassas, reforço para tubos, estabilizador de produtos químicos, compostos de reestruturação dentária, tintas, laminação de produtos elétricos, anticorrosivo em peças de automóveis, laminação de aparelhos eletrônicos e também como reforço estrutural (NETO; PARDINI, 2006).

3.3.2 Fases Dispersas

Como mostrado na Figura 8, os compósitos são classificados em três categorias principais, de acordo com seu reforço: os reforçados com partículas, os reforçados com fibras e os estruturais. O material constituinte do reforço confere ao compósito novas propriedades como resistência mecânica, rigidez, resistência ao calor, resistência à corrosão e condutividade (VENTURA, 2009).

Figura 8 – Configurações de Reforço



Fonte: Daniel e Ishai (1994)

As fibras são consideradas como a fase dispersa de maior importância na pesquisa e desenvolvimento (CALLISTER, 2002). Elas podem ser de origem natural, quando obtidas de plantas, animais ou minerais, ou sintéticas orgânicas ou inorgânicas. A fibra é o elemento que contribui com o desempenho mecânico por apresentar elevado módulo de elasticidade, conferindo alta rigidez e resistência ao compósito (MAZUMDAR, 2002).

Em materiais compósitos as fibras podem apresentar diferentes formas, como mostrado na Figura 8, sendo curtas ou longas, alinhadas ou não, interferindo nas propriedades mecânicas dos compósitos em que são utilizadas, desta forma, é muito importante a aplicação adequada do material (MAZUMDAR, 2002).

Entre outros fatores que afetam o desempenho estrutural dos compósitos reforçados com fibras estão: tipo, orientação, comprimento, grau de concentração, forma como se dispersa na matriz, composição, propriedades mecânicas da resina da matriz, adesão entre fibras e matriz (SOARES; MARTINS, 2006). Entre as principais fibras em destaque nas pesquisas atuais estão as fibras naturais, de vidro, de poliamida e de carbono. Suas principais propriedades são mostradas na Tabela 2.

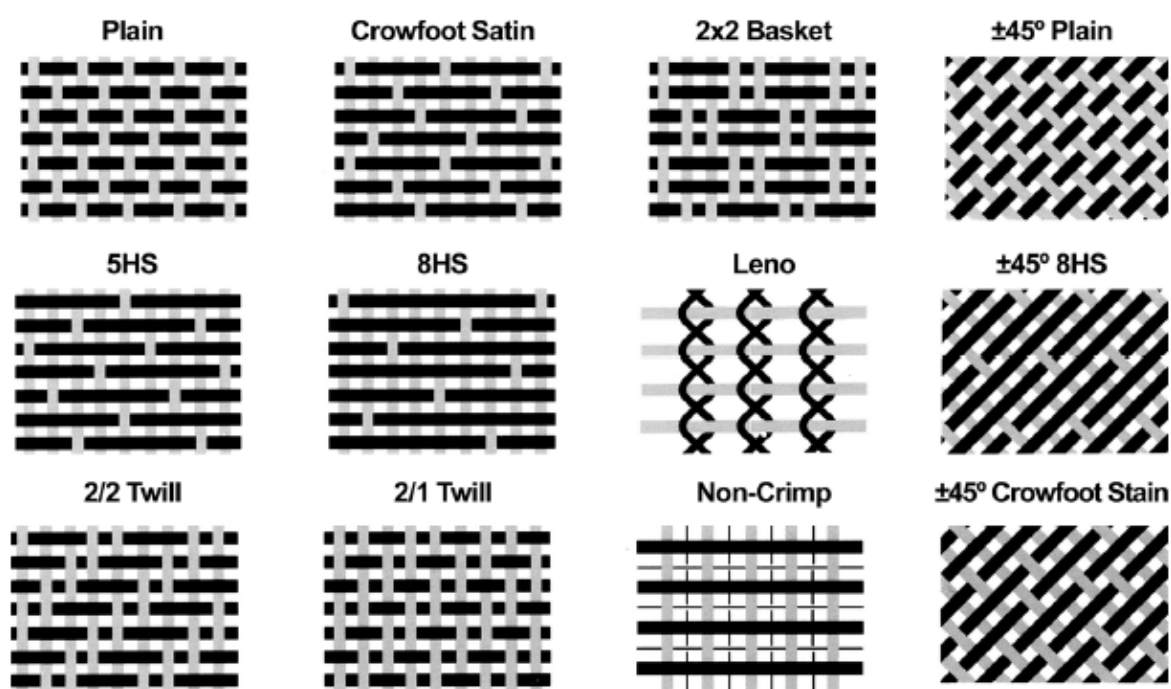
Tabela 2 – Fibras e suas Propriedades

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm³)	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Algodão	16-21	1,5-1,6	287-597	5,5-12,6	7-8
Juta	200	1,3	393-773	26,5	1,5-1,8
Linho	-	1,5	345-1035	27,6	2,7-3,2
Cânhamo	-	-	690	-	1,6
Rami	-	1,5	400-938	61,4-128	3,6-3,8
Sisal	50-300	1,45	511-635	9,4-22	3-7
Coco	100-450	1,15-1,45	131-175	4-13	15-40
Vidro - E	8-14	2,5	2000-3500	70	1,8-3,2
Vidro - S	10	2,5	4590	86	5,7
Kevlar - 49	12	1,48	2800-3792	131	2,2-2,8
Carbono	7-10	1,6-1,9	4000	230-240	1,4-1,8

Fonte: Silva (2003)

Além dos fatores elencados, outro parâmetro que interfere em suas propriedades é a sua organização em tecidos bi ou tridimensionais. Diversos tipos de tecidos trançados podem ser feitos com as fibras, sendo definidos de acordo com a “célula de unidade têxtil” ou “célula unitária” que define o padrão de repetição do tecido (ASTM, 2016). Uma grande variedade de tipos de tecidos é ilustrada na Figura 9.

Figura 9 – Tipos de Tecidos



Fonte: Furtado (2009)

A fibra de carbono é uma das fibras sintéticas utilizadas em reforços, possui diâmetro entre 7 e 10 micrômetros, constituídas mais de 90 % por carbono, e podem se apresentar na forma de fios e tecidos. Possui propriedades mecânicas semelhantes ao aço, entretanto são leves como madeira e plástico, e possui diversas características atrativas como: alta resistência à tração e módulo de elasticidade, baixa massa específica e boa resistência térmica e elétrica. É um material versátil, sendo aplicado em diversos campos, como na área aeroespacial e automotiva (MAZUMDAR, 2002).

3.4 REFORÇOS EM ESTRUTURAS

3.4.1 Técnicas de Reforços

Entre as principais técnicas de reforço utilizadas atualmente estão os reforços com concreto armado, com perfis metálicos e com materiais poliméricos reforçados com fibras. Em todos os casos os elementos devem ter seus esforços aliviados com escoramento para evitar o pré-tensionamento do reforço (ZUCCHI, 2015).

O reforço com concreto armado consiste no aumento da seção, também chamado de encamisamento. Esta técnica de reforço se baseia em envolver a seção degradada com uma nova seção de concreto com armadura própria para o reforço necessário, mostrado na Figura 10. Para que este tipo de reforço seja efetivo, é necessário que haja uma boa aderência entre o concreto do reforço e aquele a ser reforçado, promovendo uma boa transmissão de cargas. O primeiro passo desta técnica de reforço está na limpeza do elemento, removendo todo concreto alterado e também resíduos como ferrugem e graxas, através de lavagens com água, soluções alcalinas ou aplicação de jato de ar. Outro recurso de limpeza é a escovação, apicoamento ou escarificação, criando uma superfície rugosa que pode maximizar a aderência, podendo ser ainda mais incrementada através da utilização de adesivos, como epóxi (ZUCCHI, 2015; SOUZA; RIPPER, 1998; REIS, 2001; SILVA, 2006).

Figura 10 – Reforço com Aumento da Seção



Fonte: Techniques (2013b)

Outro tipo de reforço pode ser realizado utilizando elementos metálicos, como chapas ou perfis, através da colagem com adesivo, ancoragem com parafusos especiais ou solda, ilustrado na Figura 11. Assim como no reforço com concreto armado, a superfície a ser reforçada deve ser previamente limpa, removendo partículas e outros resíduos, e ter sua rugosidade maximizada. É realizada então a colagem com aplicação de adesivo epóxi ou a ancoragem com parafusos, seguido do selamento entre a chapa ou perfil e o concreto com adesivo. A ancoragem do reforço no elemento pode ser incrementada com chapas laterais ou chapas envolventes, tipo cantoneira, para evitar o descolamento do reforço, ou ainda através da soldagem do reforço com a armadura do elemento (ZUCCHI, 2015; SOUZA; RIPPER, 1998).

Figura 11 – Reforço com Perfil Metálico



Fonte: NúcleoFix (2015)

E por fim, tem-se os reforços realizados com polímeros reforçados com fibras, os PRF, como fibras de vidro, carbono e poliaramida, usufruindo da alta rigidez e resistência mecânica dos compósitos, com um baixo peso específico, como demonstrado na Figura 12. Assim como nas técnicas anteriores, é muito importante a preparação da superfície a ser reforçada, através da limpeza e aumento da rugosidade. O reforço com PRF pode ser realizado de diversas formas, como reforço a flexão, cisalhamento, por confinamento e em alvenaria estrutural, em madeiras e também metais. É uma técnica muito versátil que pode aumentar consideravelmente a vida útil dos elementos. O reforço é realizado através da colagem ou ancoragem de placas de compósito, mantas ou tecidos, de acordo com o tipo de reforço e necessidade de aumento da resistência (ZUCCHI, 2015).

Figura 12 – Reforço com Manta de Fibra de Carbono



Fonte: Techniques (2013a)

O Quadro 3 demonstra as principais vantagens e desvantagens associadas a cada tipo de técnica de reforço apresentada e especificando as vantagens e desvantagens para os principais tipos de fibras no caso dos reforços com polímero reforçado com fibras.

Quadro 3 – Vantagens e Desvantagens dos Tipos de Reforços

Tipo de Reforço	Vantagens	Desvantagens
Concreto Armado	<ul style="list-style-type: none"> - Materiais de uso comum e de fácil acesso - Técnica corriqueira nos canteiros de obra 	<ul style="list-style-type: none"> - Interferência arquitetônica / aumento de sessão - Cuidado com a aderência das camadas - Suspensão do uso da estrutura para execução do reforço e para ganho de resistência - Sujeira e nível elevado de ruído
Perfis Metálicos	<ul style="list-style-type: none"> - Execução rápida e simples 	<ul style="list-style-type: none"> - Visibilidade do elemento estrutural prejudicada - Manutenção recorrente
Polímero Reforçado com Fibras de Carbono	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência à tração elevada - Baixo peso específico - Elevado módulo de elasticidade - Para aplicação de cargas cíclicas - Imunes à corrosão - Maior quantidade de produtores - Opção de se usar os laminados 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo elevado
Polímero Reforçado com Fibras de Vidro	<ul style="list-style-type: none"> - Boa resistência à tração - Bom módulo de elasticidade - Baixo peso específico - Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo E sensível a ataque por álcalis - Perda de resistência na presença de água
Polímero Reforçado com Fibras de Aramida	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilidade térmica / resistente ao fogo - Resistência à tração elevada - Módulo de elasticidade alto - Boa resistência ao impacto - Boa resistência química - Bom comportamento à ruptura/durável - Custo intermediário 	<ul style="list-style-type: none"> - Absorção de água / inchamento – rompimento da matriz - Materiais específicos para manuseio/dureza elevada

Fonte: Zucchi (2015)

3.4.2 Inovações em Reforços com PRF

Nas últimas décadas, foram realizadas muitas pesquisas na área de polímeros reforçados com fibras (PRF) sendo utilizados como reforço em estruturas civis devido ao grande número de combinações de matrizes poliméricas e fibras que podem ser estudadas (ZAMAN; GUTUB; WAFA, 2013; PENDHARI; KANT; DESAI, 2008). Dessa forma, este setor avança continuamente criando e caracterizando novos materiais e estudando sua aplicação no setor da construção civil. A seguir são exemplificadas algumas dessas pesquisas realizadas nos últimos 5 anos.

Schober et al. (2015) estudaram o reforço de estruturas de madeiras com material PRF através de adesivos. Foi realizada uma revisão do que há de mais atual no setor, citando fibras de vidro, carbono, aramida e basalto, e também diferentes tipos de adesivos como poliuretanos, poliésteres, fenólicas e aminoplásticos, com destaque especial para os adesivos de base epóxi. Os autores apresentam também um modelo de *design* considerando fraturas e delaminações, por fim, entre as principais aplicações propostas estão: reforço na extremidade de vigas, melhora da resistência à tensão, reforço ao cisalhamento e protensão de PRF atuando na componente de tração de uma viga em flexão.

Qin, Zhou e Lau (2017) avaliam o efeito da razão de reforço na performance estrutural de vigas híbridas, reforçadas por PRF e aço. São propostos modelos 3D não-lineares de elementos finitos para simular vigas reforçadas pelo sistema híbrido. O estudo da razão entre os reforços PRF e aço permite determinar o intervalo ideal de valores que promove a resistência pós-elástica da viga com ductibilidade e rigidez suficientes. Por fim, são demonstradas as vantagens de modelos com reforço excessivo, alto desempenho estrutural, e sub-reforçados, econômico.

Zhu et al. (2018) investigaram o comportamento estrutural na flexão de vigas de concreto parcialmente armado de alta resistência reforçadas com barras de PRF de basalto através de ensaios de flexão em 4 pontos. Foi desenvolvido um modelo de cálculo do momento de inércia com o objetivo de determinar a deflexão da carga de serviço nas vigas. Observou-se também a influência da variação da razão entre o reforço de aço e de PRF, como a capacidade de flexão, ductibilidade, deflexão e fissuras.

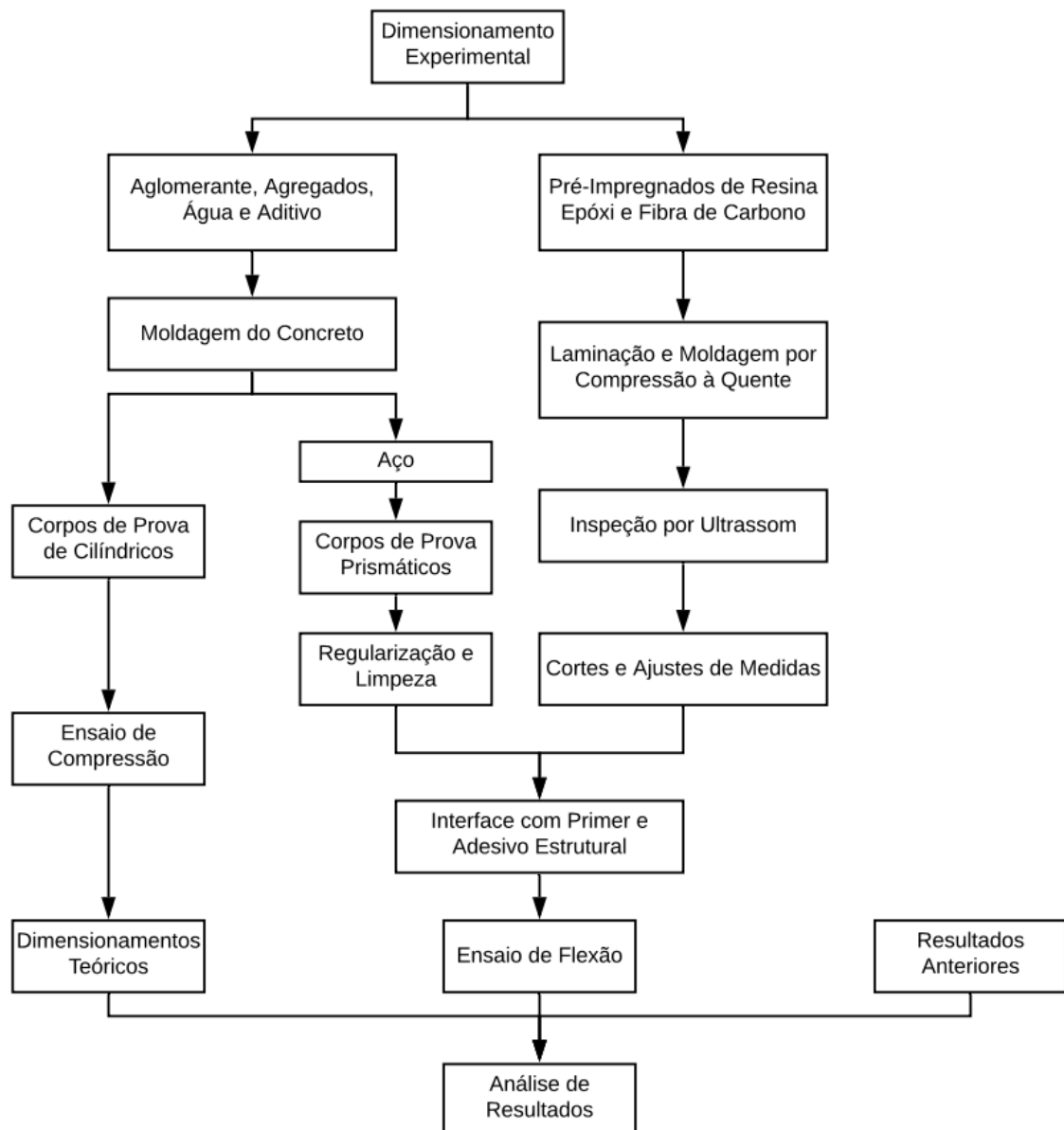
Gómez et al. (2019) estudaram o comportamento de vigas de madeiras reforçadas por diferentes tipos de PRF e fibras metálicas quando sujeitas a flexão. A adesão foi realizada através de resinas epóxis e os reforços foram preparados com fibra de carbono, fibra de carbono de alto módulo de elasticidade, fibra de vidro, fibra de basalto e fibras metálicas. Foram testadas diferentes configurações e comparados com viga sem reforço. Foi determinado que as fibras aumentaram substancialmente a resistência inicial das vigas, principalmente as fibras com menor módulo de elasticidade, como basalto e vidro.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o intuito da determinação da influência da adição do reforço estrutural, foram produzidos corpos de prova de concreto armado sem adição de reforço em PRF, corpos de prova de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono, e corpos de provas híbridos, vigas de concreto armado com a incorporação do compósito PRF por meio da adesão dos mesmos com adesivo estrutural, após devida preparação de superfície. As atividades realizadas são esquematizadas no fluxograma a seguir (Figura 13) e são descritas nas próximas seções.

Figura 13 – Fluxograma de Atividades



Fonte: Próprio do autor.

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Concreto Armado

A escolha do proporcionamento entre os materiais (traço) utilizado na preparação do concreto para a fabricação dos corpos de prova foi obtido da literatura básica (SILVA, 1975), com o intuito de se atingir um valor de resistência de 27,5 MPa após 28 dias em processo de cura. O traço em questão escolhido é representado por 1 : 2,23 : 2,99 : 0,56, ou seja, para cada parte, em peso, de cimento, será necessário 2,23 partes em agregado miúdo (areia), 2,99 partes em agregado graúdo (brita) e 0,56 partes em água. O traço, pesos e volumes utilizados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dosagem

Concreto	Traço	1,00 m ³	0,02 m ³
Cimento	1,00	350,00 kg	6,78 kg
Areia	2,23	780,50 kg	15,11 kg
Pedrisco	2,99	1046,50 kg	20,26 kg
Água	0,56	196,00 kg	3,79 kg
Aditivo Plastificante	2,00	700,00 ml	13,55 ml

Fonte: Próprio do autor.

Além dos materiais contidos no traço, foi adicionado um aditivo plastificante com o propósito de melhorar a preparação e adensamento do concreto, principalmente devido às pequenas dimensões do corpo de prova. Entretanto, se o aditivo for adicionado sem a diminuição da água, haverá um impacto negativo na resistência a compressão do concreto.

Figura 14 – Aglomerante e Agregados



Fonte: Próprio do autor.

Na preparação do concreto foi utilizado cimento CP II-F-32, areia média (com diâmetro entre 0,42 e 2,00 mm), brita 0 ou pedrisco (com diâmetro entre 4,80 e 9,50 mm) e o aditivo plastificante *Vedacit Vedalit*, com a proporção de 2 mL para cada quilograma de cimento utilizado, representados na Figura 14.

Para a armadura foi utilizado aço CA-60 com 5 mm de diâmetro, posicionado de forma a obter um cobrimento de no mínimo 9,50 mm, permitindo que a brita possa preencher todos os espaços do corpo de prova, mostrado na Figura 15. A armadura longitudinal e transversal de ramo único, foi subdimensionada para garantir a transmissão dos esforços de tração para o compósito. Os ramos da armadura foram soldados com eletrodo revestido para garantir a união e posicionamento entre eles.

Figura 15 – Armadura



Fonte: Próprio do autor.

4.2.2 Polímero Reforçado com Fibras

O compósito estrutural polimérico foi obtido da laminação de pré-impregnados *HexPly® F155* de resina epóxi, com ciclo de cura a 127 °C, resistência à tração de 80 MPa e módulo de elasticidade de 3,24 GPa, da *Hexcel Corporation*, com tecido plano de fibra de carbono, com gramatura 194 g/m² e com 50 % em volume de fibras na condição seca, com designação *Hexcel® W3T282-42"-F155* ou *W3C282-42"-F155*. A fibra de carbono apresenta resistência à tração de 848 MPa, módulo de elasticidade em tração de 58 GPa, resistência à compressão de 904 MPa e módulo de elasticidade em compressão de 57,2 GPa, considerando a temperatura ambiente de 20 °C.

4.2.3 Interface

A interface dos elementos foi realizada utilizando um preparador de superfície (*primer*) denominado *Viapol Carbon Primer*, doado pela fabricante *Viapol Ltda*, mostrado na Figura 16, e o adesivo estrutural de alta viscosidade *Sikadur 31*, da empresa *Sika AG*, mostrado na Figura 17. Ambos são bi componentes, com base epóxi, e misturados para esse trabalho na proporção recomendada fornecida pelo fabricante (SIKA, 2009; VIAPOL, 2017).

Figura 16 – Preparador de Superfície



Fonte: Próprio do autor.

Figura 17 – Adesivo Estrutural



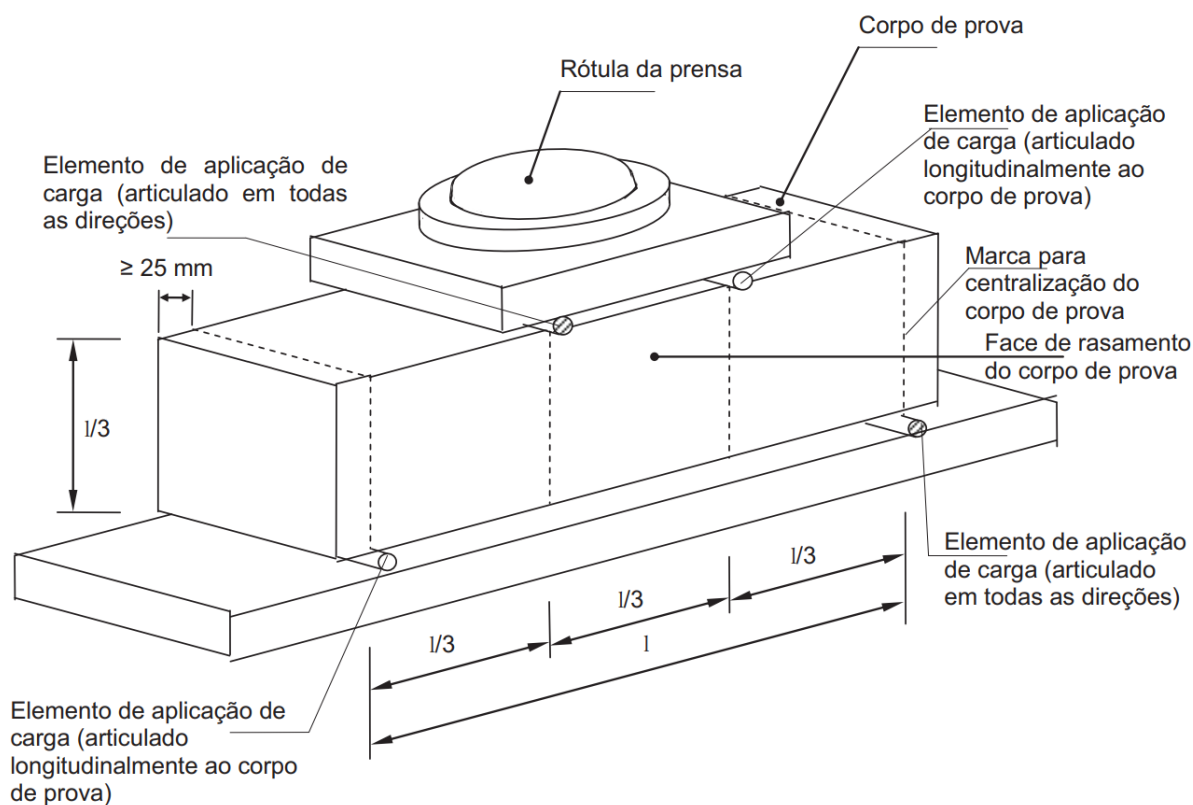
Fonte: Próprio do autor.

4.3 MÉTODOS

4.3.1 Dimensionamento Experimental

Os corpos de prova de concreto possuem seção quadrada de 60 mm x 60 mm, com um comprimento de 230 mm, considerando uma distância entre apoios de 180 mm, visando atender as especificações da norma NBR 12142:2010 para o ensaio de flexão de 4 pontos, que se baseia numa viga bi apoiada com a aplicação de duas cargas concentradas e simétricas, com as mesmas distâncias entre todos os pontos em questão, conforme Figura 18 (ABNT, 2010).

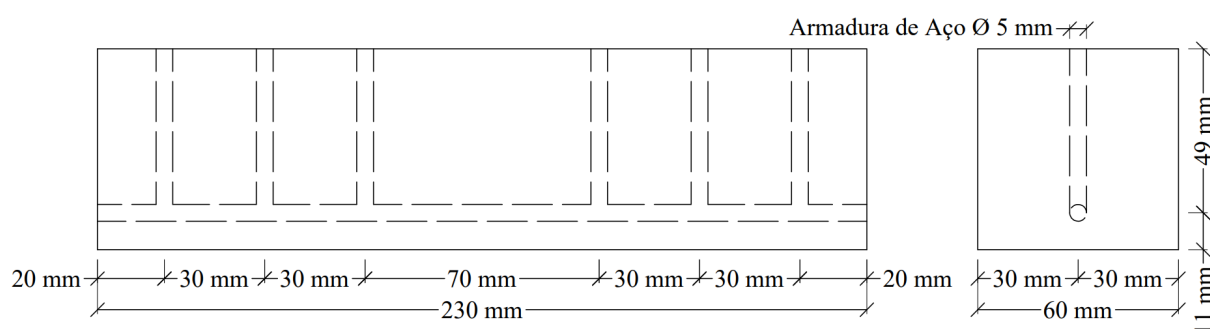
Figura 18 – Especificações da NBR 12142:2010



Fonte: ABNT (2010)

Dessa forma o corpo de prova de concreto possui as seguintes dimensões e posicionamento da armadura da Figura 19.

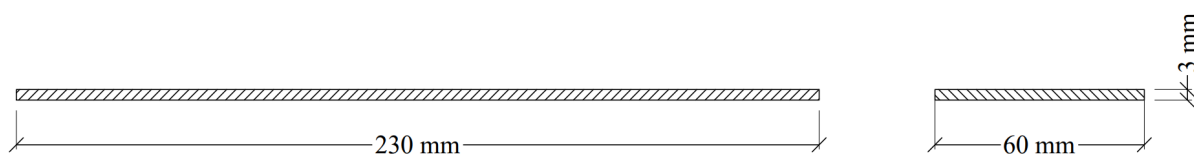
Figura 19 – Corpo de Prova de Concreto Armado



Fonte: Próprio do autor.

O compósito possui o mesmo comprimento e largura, 230 mm e 60 mm, respectivamente, com espessura de 3 mm definido pelo molde utilizado durante sua manufatura, conforme esquema na Figura 20.

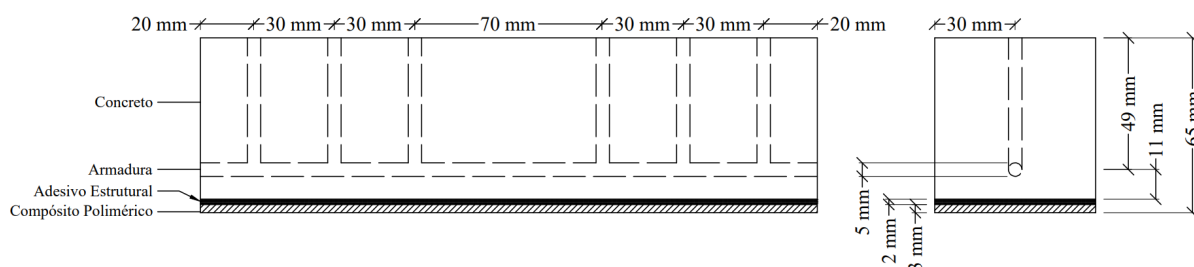
Figura 20 – Corpo de Prova de Compósito



Fonte: Próprio do autor.

Assim, com a união dos corpos de prova de concreto e de compósito, são formadas vigas híbridas, os corpos de prova terão 230 mm de comprimento, 60 mm de largura e 65 mm de altura, devido ao acréscimo de 3 mm do compósito e 2 mm do adesivo estrutural utilizado na interface dos elementos, conforme esquema da Figura 21.

Figura 21 – Corpo de Prova Híbrido



Fonte: Próprio do autor.

4.3.2 Fabricação das Peças de Concreto Armado

Foram preparados 10 corpos de prova prismáticos, de dimensões especificadas anteriormente, através de formas de madeira, garantindo as dimensões, minimizando excentricidades e garantindo o posicionamento adequado na armadura no interior do corpo de prova. Na Figura 22, a seguir, é representado um exemplo de forma utilizada.

Figura 22 – Forma



Fonte: Próprio do autor.

Foram preparados também corpos de prova cilíndricos, para a realização de ensaio de compressão, determinando a resistência a compressão do concreto preparado, conforme norma NBR 5739:2018, com altura de 200 mm e diâmetro de 100 mm (ABNT, 2018).

A preparação do concreto se deu através da mistura mecânica dos componentes, aglomerante, agregado miúdo e graúdo, aditivo e água, adicionados de forma gradual até atingir homogeneidade em betoneira disponível no Departamento de Engenharia Civil. Em seguida foi realizada a concretagem nas formas prismáticas e cilíndricas, conforme apresentado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Corpo de Prova Prismáticos



Fonte: Próprio do autor.

Figura 24 – Corpo de Prova Cilíndricos



Fonte: Próprio do autor.

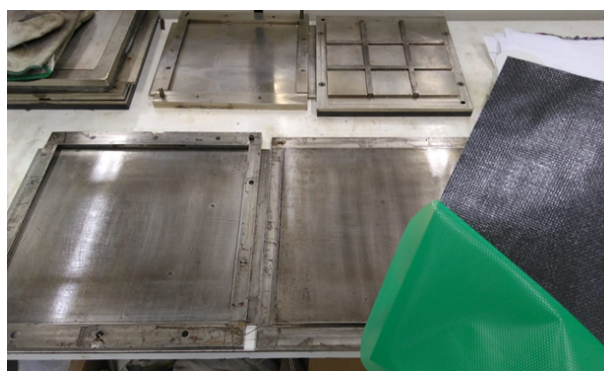
Os corpos de prova foram desenformados 3 dias após a moldagem e então mantidos em cura submersos em água em temperatura ambiente por apenas 22 dias, visando manter a metodologia utilizada em projeto anterior, antes do prosseguimento das etapas seguintes.

4.3.3 Fabricação e Inspeção do Reforço Compósito

O tecido de fibra de carbono é fornecido em tamanhos e formatos variados, desta forma primeiramente foi necessário realizar o ajuste das camadas em formato quadrado de 300 mm x 300 mm.

O material compósito baseado em fibra de carbono e resina epóxi foi manufaturado através da laminação manual e ordenada de 15 camadas do pré-impregnado com fibras orientadas em 0/90° dentro de um molde de aço utilizado para a moldagem por compressão a quente, mostrado na Figura 25. Para evitar danos ao compósito e ao molde foram passadas 3 camadas do desmoldante *Polidesmo 55*, da *Silaex Química*.

Figura 25 – Laminação em Molde de Aço



Fonte: Próprio do autor.

Após laminação, o molde foi fechado e levado a uma prensa hidráulica *Carver* modelo CMV100H-15-X com controle de aquecimento e resfriamento, disponível no Laboratório de Metalurgia do Departamento de Materiais e Tecnologia, mostrado na Figura 26.

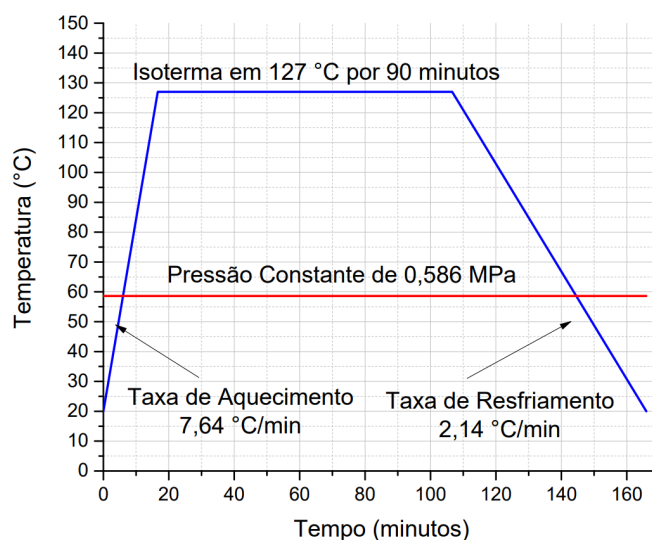
Figura 26 – Prensa Hidráulica



Fonte: Próprio do autor.

Foi realizado o processamento com ciclo de cura determinado pelo fabricante, que consiste no aquecimento até 127 °C, sendo mantida essa temperatura por 90 minutos, seguido do resfriamento até temperatura ambiente, com uma pressão constante durante todo o procedimento de 0,586 MPa, conforme Figura 27 (HEXCEL, 2016).

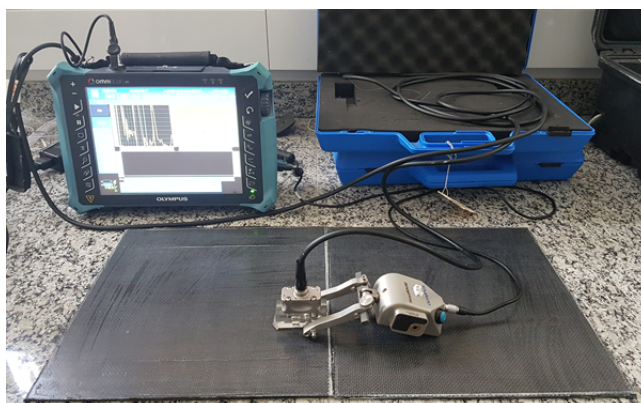
Figura 27 – Ciclo de Cura



Fonte: Adaptado de Hexcel (2016) e Silveira (2016)

Após a moldagem e remoção da placa de material compósito do molde, realizado de forma a não danificar ambos, as placas foram submetidas a um ensaio de ultrassom, que tem como objetivo detectar tamanho e localização de defeitos, como rachaduras, delaminações, vazios, entre outros, em decorrência de problemas durante o processamento. Foi utilizado um ultrassom portátil *OmniScan MX* da *Olympus*, com gel como meio de propagação e transdutor de frequência de 10 MHz, e utilizando os métodos *A-Scan* e *C-Scan* para obtenção dos dados. O equipamento encontra-se disponível no Núcleo de Tecnologia em Compósitos (NTC) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e é apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Ultrassom



Fonte: Próprio do autor.

Após inspeção por ultrassom foi realizado o ajuste das dimensões dos corpos de prova do compósito. Inicialmente foi realizado o corte sem precisão em serra de fita RMF.400-S da *Romarfra* (Figura 29), disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT/FEG/UNESP).

Figura 29 – Serra de Fita



Fonte: Próprio do autor.

E em seguida, realizado o ajuste milimétrico em fresa a seco DMU 50 ECO, da *DMG MORI* (Figura 30), também disponível no DMT/FEG/UNESP, promovendo melhor acabamento e minimizando acumuladores de pressão que podem influenciar no ensaio mecânico.

Figura 30 – Fresa

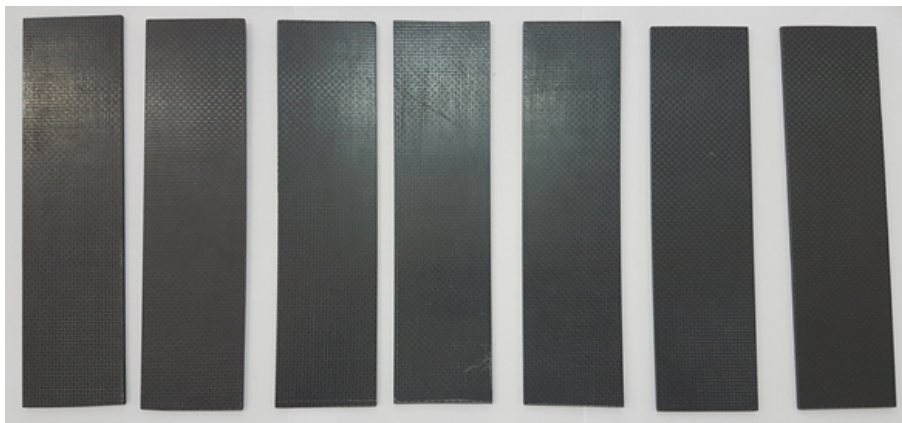


Fonte: Próprio do autor.

4.3.4 Interface entre Reforço e Substrato

Das duas placas preparadas foram retirados 7 corpos de prova de 230 mm x 60 mm x 3 mm, como especificado anteriormente, mostrados na Figura 31.

Figura 31 – Corpos de Prova de Compósito



Fonte: Próprio do autor.

Após os 22 dias de cura em água dos corpos de prova de concreto, todos são deixados ao ar para secagem natural por 2 dias para retirar a umidade excessiva da superfície, conforme Figura 32.

Figura 32 – Corpos de Provas de Concreto Armado Secos



Fonte: Próprio do autor.

Em seguida iniciou o processo de preparação do substrato para posterior colagem do compósito. Esta é uma etapa crítica que deve ser realizada cuidadosamente, pois qualquer fator externo pode causar impacto no desempenho estrutural da viga.

Primeiramente foi feito o lixamento da superfície inferior de quatro corpos de prova prismáticos que irão receber o compósito. Esse lixamento foi realizado com lixa de gramatura de 100 a

140, promovendo uma superfície com ótimo acabamento e poros expostos. A seguir foi realizado a limpeza com jateamento de ar e escovas, removendo o máximo de partículas da superfície do substrato, que poderia comprometer as etapas seguintes.

Em seguida foi realizada a aplicação do *primer* com rolo de espuma para pintura, com o objetivo de se formar uma camada regular, como mostrado na Figura 33. O *primer* penetra a superfície por capilaridade através dos poros expostos e melhora a aderência entre o substrato e o adesivo.

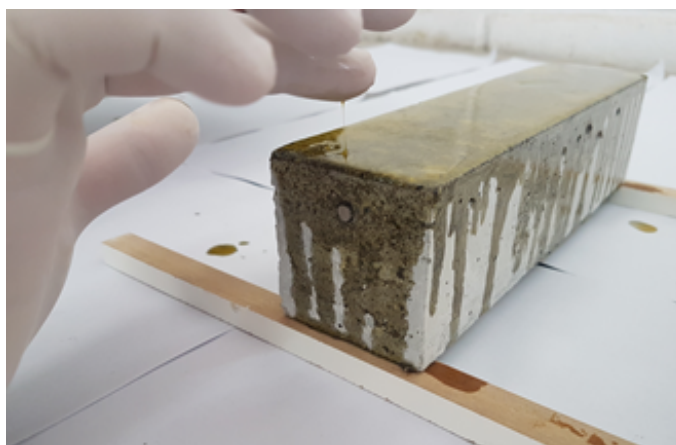
Figura 33 – Aplicação do Primer



Fonte: Próprio do autor.

Após a aplicação do *primer*, foi aguardado um período de aproximadamente 2 horas, o tempo necessário para o produto apresentar uma textura adesiva, também chamada de *tack*, como pode ser observado na Figura 34.

Figura 34 – Textura Adesiva (*tack*)



Fonte: Próprio do autor.

O *tack* indica que a superfície está preparada para receber o adesivo estrutural. O mesmo é aplicado com uma camada regular em toda a superfície de aproximadamente 2 mm, espessura controlada por escala metrológica, para que a carga em ensaio de flexão seja equivalente em toda a extensão do corpo de prova, como mostrado na Figura 35.

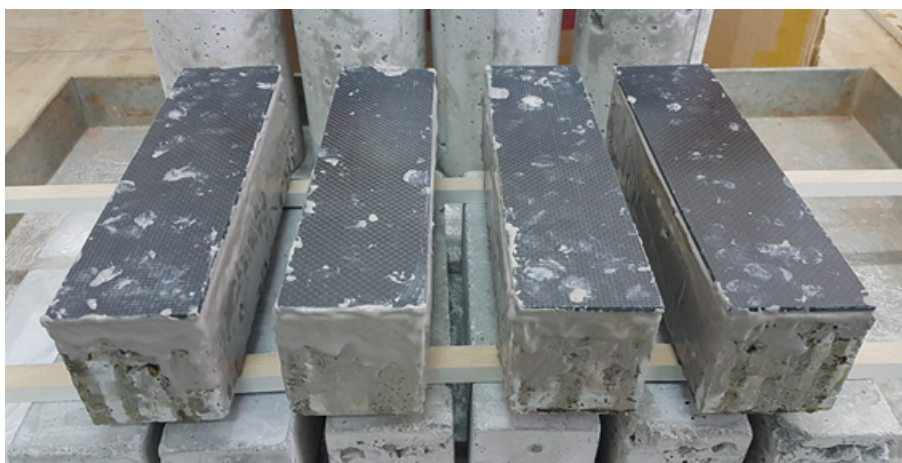
Figura 35 – Aplicação do Adesivo



Fonte: Próprio do autor.

O compósito foi, então, posicionado sobre o adesivo estrutural, com aplicação de pressão para garantir que o compósito foi colado de forma homogênea e minimizando vazios, sempre com o controle da espessura com paquímetro, conforme Figura 36. Após a colagem do compósito, os corpos de prova foram mantidos ao ar em temperatura ambiente por 5 dias.

Figura 36 – Colagem do Compósito



Fonte: Próprio do autor.

4.3.5 Ensaios de Compressão

O ensaio de compressão nos 4 corpos de provas cilíndricos, que visa obter a resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}), foi realizado em uma prensa universal da marca *Heckert*, disponível no DEC/FEG/UNESP (Figura 37). O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da norma NBR 5739:2018, que trata sobre ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018).

Figura 37 – Máquina de Ensaio de Compressão



Fonte: Próprio do autor.

4.3.6 Dimensionamento Teórico

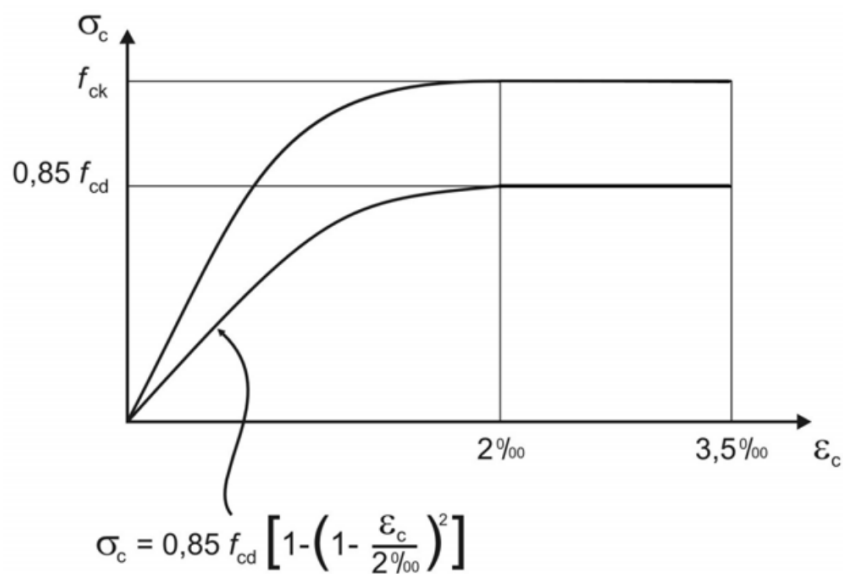
O dimensionamento das vigas de concreto armado é realizado através da metodologia utilizada na instituição, que é baseada em considerações normativas da NBR 6118:2014 e tem como hipótese uma viga de seção retangular sujeita a momento fletor de cálculo e o objetivo da determinação de aço necessária para combater a tração originada na peça (ABNT, 2014).

O dimensionamento leva em consideração diversas características dos materiais envolvidos e das condições de carregamento, como a resistência do concreto preparado, do aço utilizado e do momento fletor que incide sobre a peça.

Assim como Andrade (2017) considerou em sua monografia, para a utilização deste procedimento é necessário adotar algumas hipóteses:

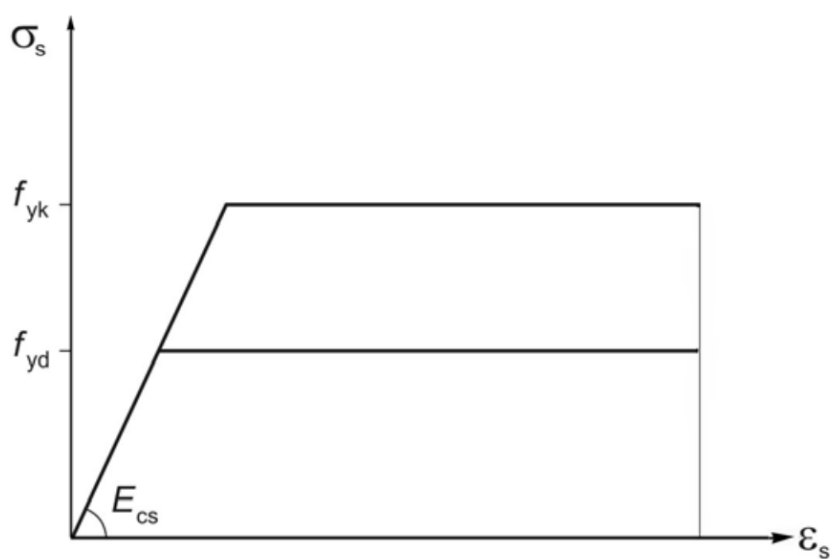
- Resistência à tração do concreto desprezível;
- Hipótese de Navier-Bernoulli em que a seção permanece plana antes e após a deformação;
- Diagrama simplificado retangular de tensões ao invés do parábola-retângulo.
- Diagrama Tensão x Deformação do concreto idealizado (Figura 38);
- Diagrama Tensão x Deformação do aço idealizado (Figura 39);

Figura 38 – Diagrama Tensão x Deformação do Concreto



Fonte: ABNT (2014)

Figura 39 – Diagrama Tensão x Deformação do Aço



Fonte: ABNT (2014)

O dimensionamento foi realizado de acordo com o comportamento que se deseja na viga em relação à deformação do concreto e do aço. Para isso utiliza-se um coeficiente chamado " K_X " que relaciona dimensões da peça e deformações. Inicialmente ele é definido pela razão entre " x ", distância entre a fibra mais comprimida e a linha neutra, e " d ", altura útil da viga, distância entre a fibra mais comprimida e o centro de gravidade da armadura, conforme Figura 40.

" K_X " inferior à 0,26; e quando o aço encontra-se em escoamento quando o concreto atinge a deformação específica na ruptura, sendo este o domínio 3, para o intervalo de " K_X " entre 0,259 e 0,585.

E por fim, denomina-se como viga superarmada quando o concreto já atingiu a deformação específica na ruptura e o aço não atingiu sua deformação específica de escoamento, apresentando um " K_X " superior 0,585.

Com essas considerações, é possível utilizar as equações a seguir para determinação da área de armadura necessária para suportar determinada carga, ou o processo inverso, determinação da carga a partir de uma armadura pré-determinada, como realizado neste trabalho. Os demais coeficientes foram utilizados com o propósito de organização e direcionamento do raciocínio

$$K_C = \frac{M_d}{b_w * d^2 * f_{cd}} \quad (2)$$

$$K_X = 1,25 * \sqrt{1,5625 - 3,6765 * K_C} \quad (3)$$

$$K_S = \frac{1}{1 - 0,4 * K_X} \quad (4)$$

$$A_S = \frac{K_S * M_d}{d * f_{yd}} \quad (5)$$

O dimensionamento do compósito polimérico foi realizado com auxílio de uma planilha eletrônica preparado de acordo com manual baseado em considerações normativas da ACI 440.2R-08 e ACI 318-99 (MACHADO, 2017; ACI, 1999; ACI, 2008). O dimensionamento é iterativo e baseia-se nas dimensões da seção transversal, área de aço e propriedades mecânicas do elemento sendo reforçado. Além disso, são base para o dimensionamento, a hipótese de Navier-Bernoulli, desprezo da resistência à tração do concreto, considerações de aderência perfeita entre concreto e sistema PRF e de deformações lineares até o instante da ruptura do sistema PRF.

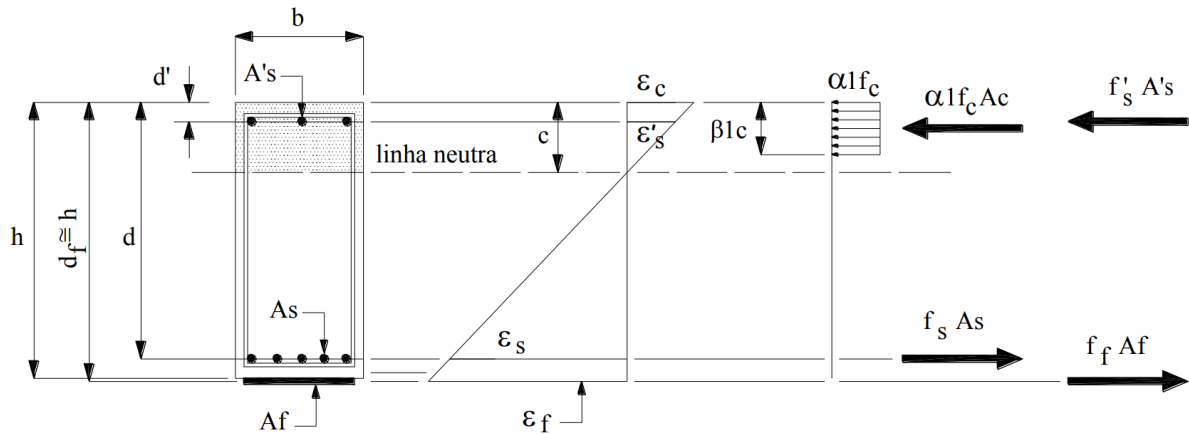
A planilha eletrônica segue os seguintes passos utilizando os dados da Figura 42 e Equação 6:

$$M_d = A_S * f_{yd} * (d - \frac{y}{2}) + A_f * f_f * (d_f - \frac{y}{2}) \quad (6)$$

- Estipulação da linha neutra (LN);
- Determinação das deformações;
- Cálculo das tensões;
- Cálculo do momento fletor resistente através do equilíbrio de esforços;
- Comparação com o momento fletor solicitante;

- Caso as duas não coincidam, uma nova LN é estipulada e o cálculo e as etapas são realizadas novamente;
- Com o valor do momento é calculado a área do reforço.

Figura 42 – Definições do Dimensionamento do Compósito



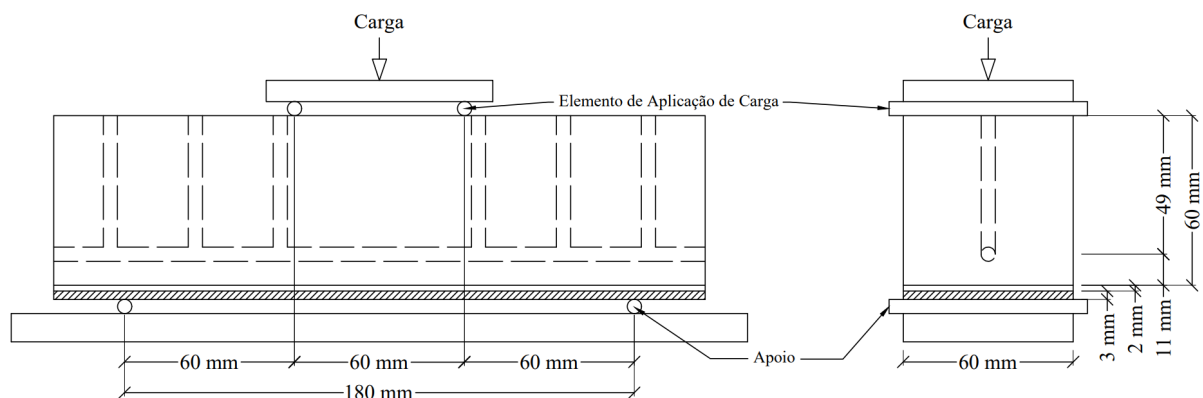
Fonte: Machado (2017)

Como neste caso as dimensões do reforço foram pré-determinadas, o cálculo foi realizado de forma inversa, com uma área de reforço definida, foram adotados diferentes valores de LN e de momento solicitante até a convergência dos valores.

4.3.7 Ensaios de Flexão

Os ensaios de flexão em 4 pontos foram realizados utilizando as orientações da norma NBR 12142:2010 na montagem do ensaio, as dimensões entre apoios e cargas podem ser observadas na Figura 43 (ABNT, 2010).

Figura 43 – Condições de Cargas e Apoios



Fonte: Próprio do autor.

Foi utilizada uma máquina de ensaios universal modelo AG-X da *Shimadzu* (Figura 44), disponível no DMT/FEG/UNESP.

Figura 44 – Máquina de Ensaio Universal



Fonte: Próprio do autor.

No total foram realizados ensaios em 11 corpos de prova, com numeração e tipologia conforme Quadro 4, utilizando célula de carga de 50 kN e com ponto de parada definido pela ruptura detectada pelo equipamento. Nos ensaios dos corpos de prova de concreto armado e híbridos foi utilizado uma velocidade de 0,5 mm/min, enquanto nos corpos de prova de PRFC foi utilizado uma velocidade de 5 mm/min. A diferença de velocidade foi definida devido à diferença de deformação entre os tipos de corpos de prova, como o PRFC apresenta uma grande deformação antes da ruptura, adotou-se uma maior velocidade de ensaio.

Quadro 4 – Numeração dos Corpos de Prova

CDP	Tipo
1	Concreto Armado
2	
3	
4	
5	Polímero Reforçado por Fibras de Carbono
6	
7	
8	Híbrida CA + PRFC
9	
10	
11	

Fonte: Próprio do autor.

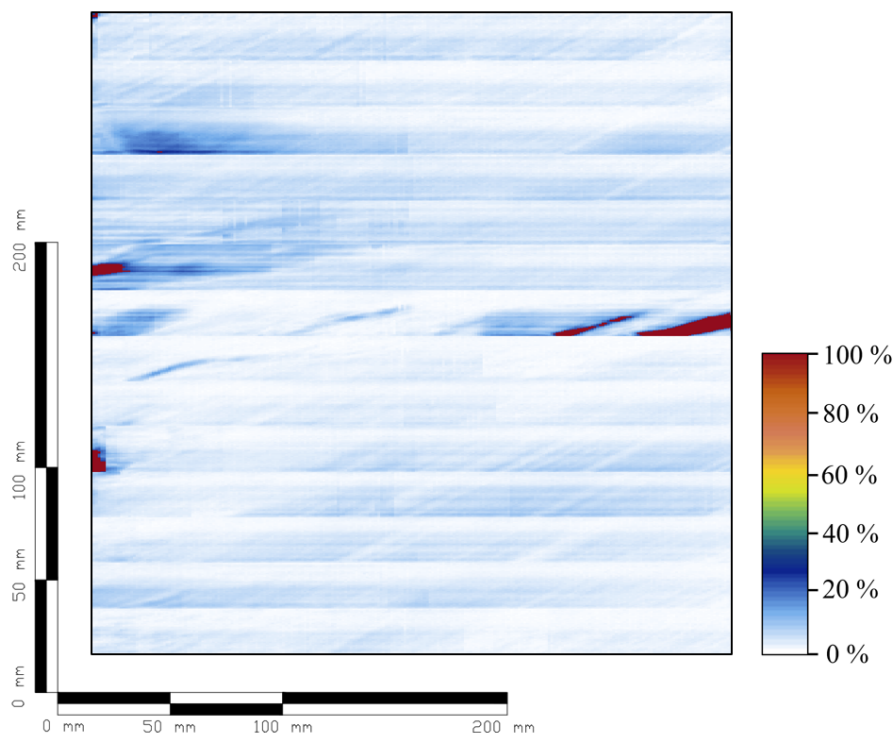
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 INSPEÇÃO DO REFORÇO DE COMPÓSITO

Após o compósito ser processado via moldagem por compressão a quente, o mesmo foi inspecionado por um ensaio não destrutivo de ultrassom para que pudesse ser avaliada a qualidade da compactação após o processamento, além de outros tipos de defeitos mencionados anteriormente.

Para que fosse possível a produção de material suficiente para a realização do ensaio de flexão em múltiplos corpos de prova, foram preparadas duas placas de 30 x 30 cm. A primeira processada sem a necessidade de emendas e a segunda com emendas para garantir a proporção de resina e fibra. De forma geral, o ensaio indicou através de uma escala de cor, alterações nas ondas de ultrassom causadas pela presença de defeitos, estes são indicados pela cor vermelha, enquanto os tons azul-claros indicam uma compactação homogênea. A Figura 45 apresenta o resultado do ensaio de ultrassom para a placa sem emendas.

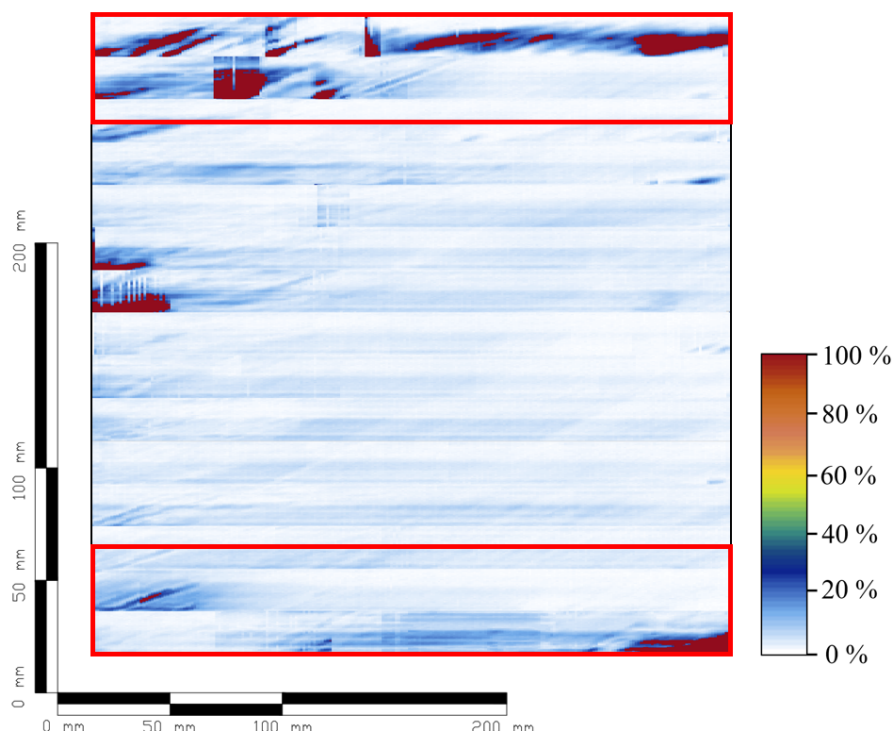
Figura 45 – Placa moldada sem emendas laterais



Fonte: Próprio do autor.

Na primeira placa observa-se que foram detectados defeitos apenas em suas extremidades, isso ocorre principalmente devido a irregularidades presentes no molde de aço em decorrência da sua ampla utilização, mas também pode ocorrer por falhas no processo de laminação. A Figura 46 apresenta os resultados do ensaio de ultrassom obtidos para a placa com emendas.

Figura 46 – Placa moldada com emendas laterais



Fonte: Próprio do autor.

Nesta segunda placa, detecta-se uma quantidade muito maior de defeitos, um comportamento esperado devido a descontinuidade causada pelas emendas. Na parte superior da imagem é possível observar uma grande concentração de irregularidades nas tiras de emenda utilizadas para manter a proporção de fibra/resina, que possuem aproximadamente 50 x 300 mm. Outros defeitos podem ser observados na parte central, causados pelos mesmos motivos elencados na análise da primeira placa.

Dessa forma, com o objetivo de se obter um desempenho estrutural maximizado, tais regiões citadas foram descartadas no processo de corte das placas, utilizando apenas as regiões onde foram observadas uma compactação mais homogênea e a continuidade das fibras de carbono.

5.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Após a moldagem dos corpos de prova cilíndricos e o devido processo de cura, foi realizado o ensaio de compressão, a fim de determinar a resistência à compressão característica (f_{ck}) do concreto preparado que deveria ser utilizado no dimensionamento teórico para definição de valores de referência. A Figura 47 apresenta os corpos de prova antes do ensaio. Com o ensaio de compressão foram obtidos os valores de cargas que os corpos de prova resistiram até a ruptura. Com os dados de carga e da seção transversal do corpo de prova, determinou-se a tensão à compressão. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos.

Figura 47 – Corpos de Prova Cilíndricos



Fonte: Próprio do autor.

Tabela 4 – Cargas e Tensões Máximas - CDPs Cilíndricos

Corpo de Prova Cilíndrico	Força Máxima (kN)	Tensão Máxima (MPa)
1	144,98	18,46
2	117,66	14,98
3	147,04	18,72
4	142,51	18,14
Média	138,05 ± 13,72	17,58 ± 1,75

Fonte: Próprio do autor.

Dessa forma, foi utilizado o valor médio na planilha de dimensionamento, considerando 17,58 MPa de resistência característica do concreto à compressão, que foi utilizado para determinar o momento resistente das vigas de concreto armado com e sem o reforço de material compósito. A Figura 48 mostra os corpos de prova após o ensaio de compressão.

Figura 48 – Corpos de Prova Cilíndricos Rompidos



Fonte: Próprio do autor.

5.3 DIMENSIONAMENTO TEÓRICO

O dimensionamento teórico para obtenção de valores de referência para o momento resistente obtido a partir do ensaio foi realizado em duas etapas. A primeira etapa consistiu na determinação do valor teórico para os corpos de prova de concreto armado, sem adição do reforço compósito. O dimensionamento consistiu na adoção do valor de " K_X ", que irá determinar o comportamento esperado da viga sujeita à flexão, e a utilização de valores definidos no dimensionamento prático, a respeito de dimensões e materiais utilizados. O valor de " K_X " adotado foi de 0,422, o ponto médio entre os limites do domínio 3, 0,259 e 0,585. Esse valor determina que a viga estará em condição subarmada, ou seja, possuirá uma taxa de aço menor que ideal, simulando um erro de projeto ou aumento da carga aplicada sobre o elemento.

Com o valor de " K_X " e as Equações 4 e 5, determinou-se o momento resistente de cálculo da viga. Primeiramente obteve-se o coeficiente " K_S ", incluindo o coeficiente " K_X " na Equação 4, e em seguida se obteve-se o momento fletor de cálculo " M_d ", incluindo o coeficiente " K_S ", a altura útil " d ", a resistência de escoamento do aço " f_{yd} " e a área de aço da armadura " A_S " na Equação 5. A Tabela 5 indica os valores utilizados, conforme explicado anteriormente, e o momento fletor de cálculo obtido, de 41,72 kN.cm.

Tabela 5 – Dimensionamento da Viga de CA

Parâmetros de Dimensionamento	
K_X	0,42
K_S	1,20
d	4,90 cm
f_{yk}	60,00 kN/cm ²
f_{yd}	52,17 kN/cm ²
$\emptyset_S$	0,50 cm
A_S	0,20 cm ²
M_d	41,72 kN.cm

Fonte: Próprio do autor.

A segunda etapa consistiu na determinação do valor teórico para os corpos de prova híbridos, de concreto armado com o reforço compósito. Ele foi realizado a partir de uma planilha eletrônica através da adição de valores de módulo de elasticidade, deformação e resistência à compressão característica do concreto. Nesta situação o dimensionamento é realizado de forma inversa, pois a área de reforço foi definida previamente, de acordo com as dimensões 3 x 60 mm, resultando em 180 mm², desta forma, utilizou-se um método iterativo para determinar a linha neutra a partir do equilíbrio de forças na viga. Quando ocorreu a convergência para um valor de momento

em que a viga estivesse em equilíbrio de forças e possuísse uma área de 180 mm² de reforço, definiu-se o momento de cálculo a que a viga resiste.

A convergência ocorreu para o valor de momento de 87,13 kN.cm, onde obteve-se o equilíbrio exato de forças e uma área de 179,99 mm², não sendo possível uma precisão maior. Com o objetivo de se obter o valor em kN, para comparação com dados de ensaio, utilizou-se a fórmula a seguir, que considera o coeficiente de segurança, que minora o momento resistente em 1,4, e também as condições de apoio e parâmetros de ensaio.

$$F_{k,max} = \frac{M_d * 3 * 2}{1,4 * l}$$

Dessa forma, a carga resistente para os corpos de prova de concreto armado sem reforço é 9,93 kN e com reforço é 20,75 kN.

5.4 ENSAIOS DE FLEXÃO

O ensaio de flexão foi realizado em 11 corpos de prova, conforme numeração e tipo ilustrados no Quadro 4. Com eles, foram gerados os diagramas de Tensão x Deformação, a partir da Carga e Deslocamento obtidos diretamente pela máquina de ensaios universal.

5.4.1 Vigas de Concreto Armado

A partir da análise do gráfico da Figura 49 observa-se que todos os corpos de prova (CDPs 1 a 4) apresentaram valores máximos maiores que o valor de referência (9,93 kN, equivalente a 8,28 MPa), com uma dispersão entre 8,66 e 10,26 MPa e média 9,39 MPa. Os valores de tensão superiores à referência ocorrem devido a diversos fatores, como utilização de um modelo de cálculo conservador, qualidade da matéria prima utilizada, principalmente o aditivo, ajuste do traço durante a moldagem, e condições de cura, secagem e armazenamento, com fatores como umidade e temperatura ambiente.

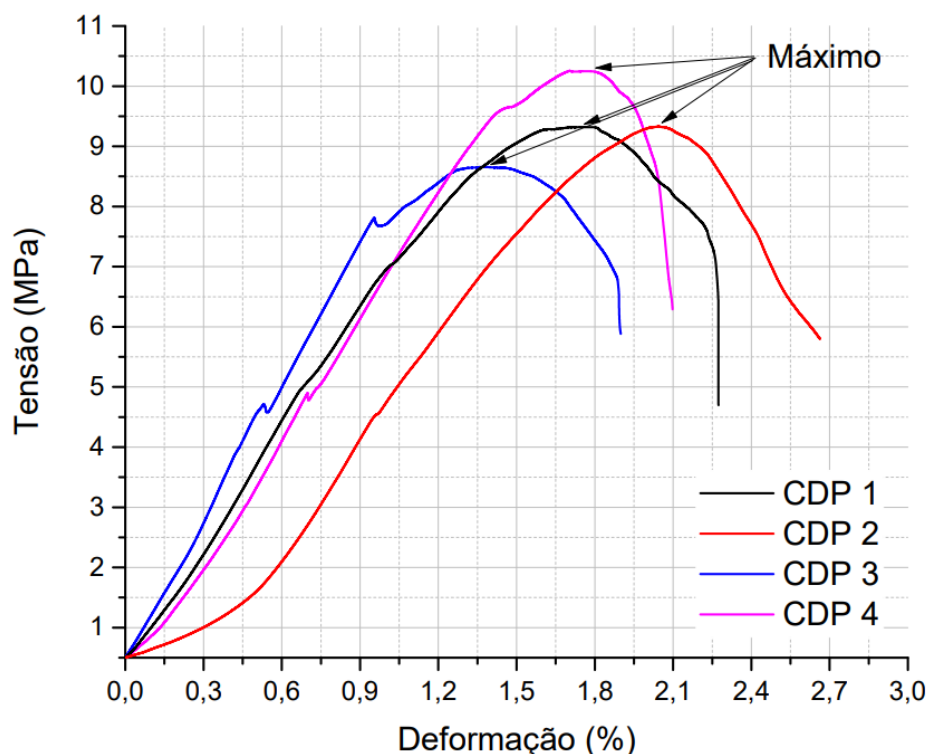
A Tabela 6 indica os valores de carga máxima e respectiva tensão de flexão obtidos experimentalmente, bem como seus valores médios, 13,43 % maiores que os valores de referência.

Tabela 6 – Cargas e Tensões Máximas - CDPs Prismáticos de CA

Corpo de Prova Prismático	Força Máxima (kN)	Tensão Máxima (MPa)
1	11,19	9,32
2	11,19	9,33
3	10,39	8,66
4	12,31	10,26
Média	11,27 ± 0,79	9,39 ± 0,66

Fonte: Próprio do autor.

Figura 49 – Gráfico Tensão x Deformação - CDPs Prismáticos de CA



Fonte: Próprio do autor.

Observa-se também um comportamento elástico no início do ensaio, com oscilações devido ao assentamento do corpo de prova entre os apoios e cargas na máquina de ensaio. É possível notar também que os corpos de prova 3 e 4 apresentaram um patamar de escoamento, associado ao comportamento do aço, antes de assumir um comportamento plástico mais claro e prosseguir para o pico de carga.

5.4.2 Vigas de Compósito

O ensaio de flexão nas placas de compósito (CDPs 5 a 7) forneceu o diagrama Tensão x Deformação apresentado na Figura 50 e valores máximo de força e tensão na Tabela 7. Os valores máximos de tensão flutuaram entre 3327,57 e 4065,15 MPa, com média 3628,79 MPa. É muito fácil notar a mudança de comportamento do material durante o ensaio de flexão. Até tensões no intervalo de 500 a 750 MPa, com deformações próximas a 1,1 %, nota-se que o material possui comportamento elástico, aumentando gradualmente a tensão ao longo do ensaio.

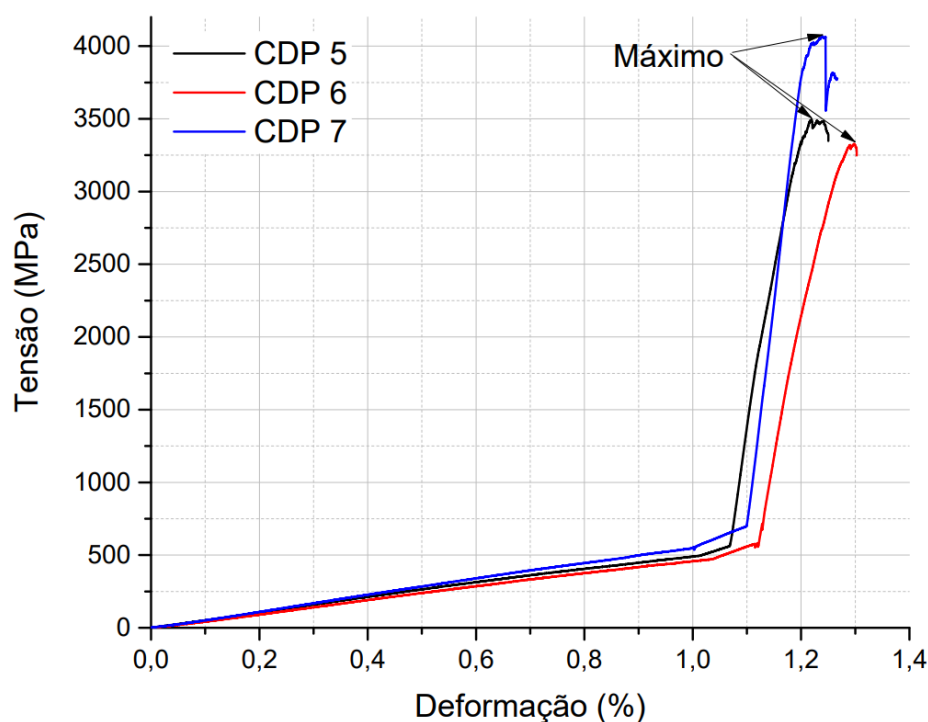
Em seguida observa-se um aumento muito intenso da tensão com mudanças tímidas na deformação, indicando o início do comportamento plástico. Momentos antes de atingir a tensão máxima, é possível observar oscilações no diagrama, causado pelo fenômeno de estricção, diminuição da seção transversal, e do rompimento isolado de filamentos da fibra de carbono, transferindo os esforços para as fibras nas imediações até a ruptura completa do material.

Tabela 7 – Cargas e Tensões Máximas - CDPs Prismáticos de Compósito

Corpo de Prova Prismático	Força Máxima (kN)	Tensão Máxima (MPa)
5	10,48	3493,66
6	9,98	3327,57
7	12,20	4065,15
Média	$10,89 \pm 1,16$	$3628,79 \pm 386,91$

Fonte: Próprio do autor.

Figura 50 – Gráfico Tensão x Deformação - CDPs Prismáticos de Compósito



Fonte: Próprio do autor.

O formato incomum do gráfico é atribuído ao equipamento utilizado para transformar o ensaio de flexão de 3 pontos em 4 pontos. Devido ao formato do mesmo e à grande deformação da placa de compósito, em determinado ponto do ensaio existe o contato inesperado entre os mesmos, interferindo na distribuição de carga e criando novos pontos de tensão. Apesar da interferência, os dados de tensão foram calculados normalmente, de acordo com as recomendações da norma NBR 12142:2010 (ABNT, 2010), uma vez que não foi possível evitar a interferência ou considerá-la no cálculo.

5.4.3 Vigas Híbridas

Por fim, a Figura 51 ilustra os resultados do ensaio de flexão nas vigas híbridas (CDPs 8 a 11). Assim como no ensaio das vigas de concreto armado sem reforço de compósito, todos os corpos de prova apresentaram valores de força e tensão superiores aos valores de referência.

Eram esperados valores máximos de força de 20,75 kN, o equivalente a 14,73 MPa de tensão. Os valores obtidos experimentalmente se mostraram consideravelmente superiores, indicando que o modelo de cálculo utilizado é muito conservador, superdimensionando os elementos estruturais.

Analisando as curvas obtidas no diagrama de Tensão x Deformação, não é possível determinar uma variação no comportamento do material, indicando que, desde o início do ensaio até a ruptura, as vigas híbridas apresentaram comportamento elástico, não apresentando deformações plásticas até o momento de sua ruptura, quando os corpos de prova já entraram em colapso estrutural.

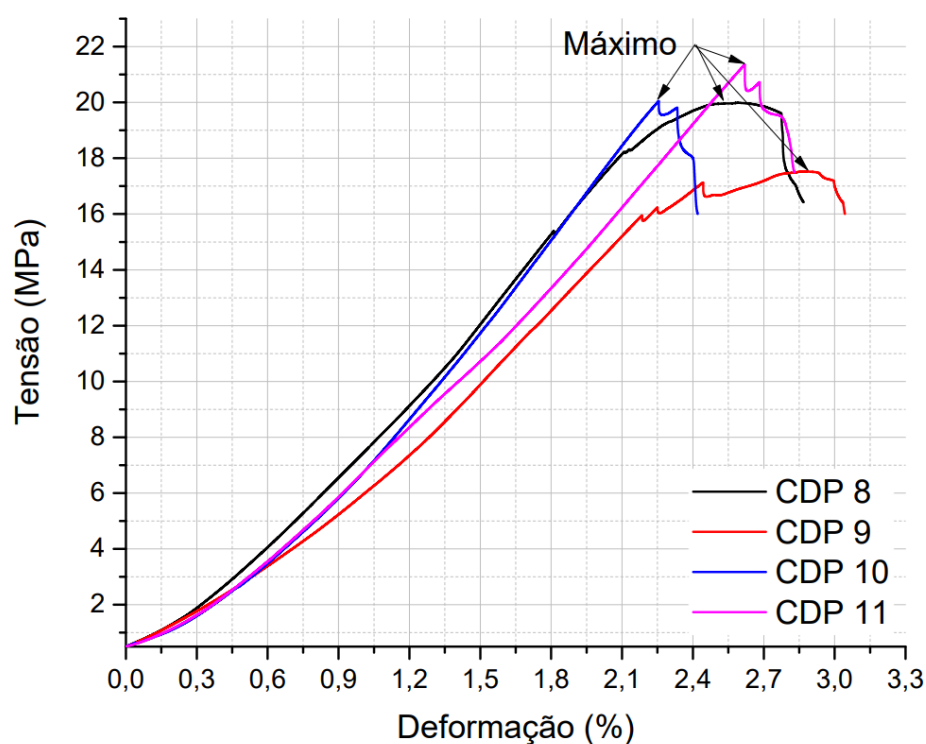
A Tabela 8 indica os valores de carga máxima e respectiva tensão de flexão obtidos experimentalmente, bem como seus valores médios, 33,96 % maiores que os valores de referência.

Tabela 8 – Cargas e Tensões Máximas - CDPs Prismáticos Híbridos

Corpo de Prova Prismático	Força Máxima (kN)	Tensão Máxima (MPa)
8	28,15	19,99
9	24,69	17,53
10	28,24	20,05
11	30,08	21,36
Média	27,79 ± 2,25	19,73 ± 1,60

Fonte: Próprio do autor.

Figura 51 – Gráfico Tensão x Deformação - CDPs Prismáticos Híbridos

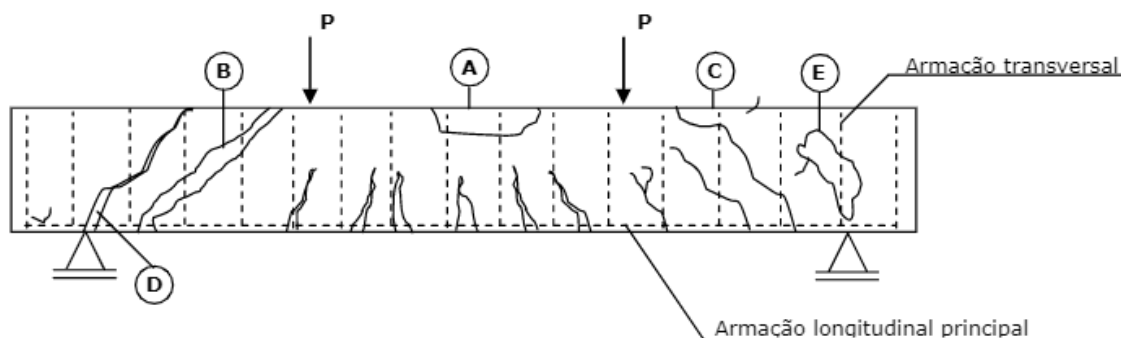


Fonte: Próprio do autor.

5.5 ANÁLISE DE FISSURAÇÃO

A análise de fissuração que será realizada se baseia nos modelos de rupturas propostos por Sussekind (1987) e estudados por Rocha et al. (2004) em seu trabalho sobre a reprodução dos ensaios de *Stuttgart*, que tem como objetivo demonstrar os tipos de falhas que podem ocorrer em elementos sujeitos à flexão. Os modelos de ruptura são ilustrados na Figura 52.

Figura 52 – Modelos de Ruptura



Fonte: Sussekind (1987)

5.5.1 Vigas de Concreto Armado

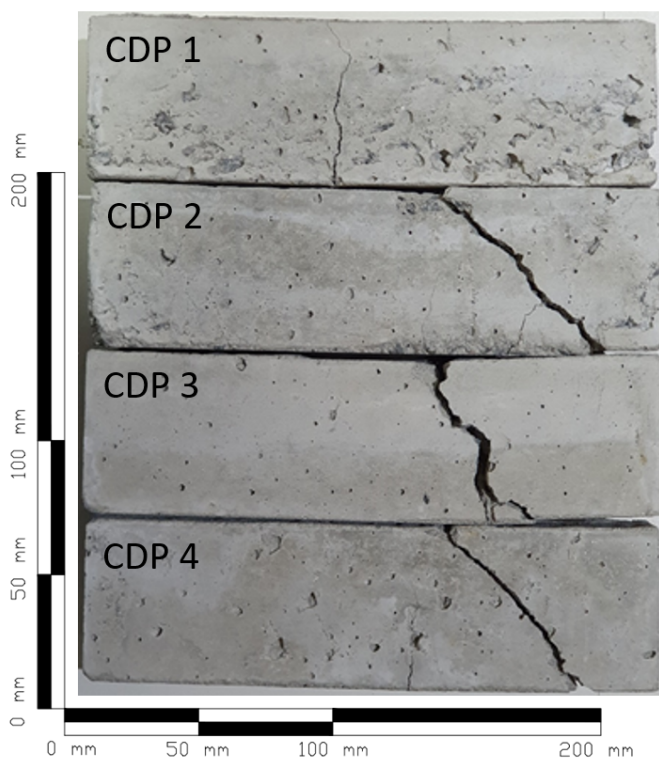
A Figura 53 ilustra as rupturas observadas nos corpos de prova sem reforço. Comparando com os modelos de ruptura propostos, observa-se que o CDP 1 apresentou fissura na região A, que pode indicar dois tipos de ruptura, entretanto como se sabe que a viga foi subarmada, conclui-se que o processo de ruptura teve início pelo aço, ultrapassando seu limite de escoamento e deformando a fibra tracionada da viga, causando trincas nesta parte.

O CDP 2 e 4 apresentam o mesmo tipo de modelo de ruptura, com fissuras no apoio, região D. Conclui-se que os corpos de prova romperam devido à ancoragem deficiente da armadura longitudinal. Neste modelo de ruptura a peça entra bruscamente em colapso causado pelo deslizamento da armadura dentro da peça, causando rupturas da parte inferior à parte superior da peça.

Já o CDP 3 apresentou um modelo de ruptura diferenciado, por estar localizando na região entre os apoios, aproximadamente em um terço do comprimento total da viga. Esse tipo de fissura, na região C, indica ruptura por compressão da mesa devido ao esforço cortante. Esse tipo de ruptura indica deficiência da armadura transversal, esta atinge seu limite de escoamento, causando fissuras na região comprimida apesar de momento fletor inferior àquele presente no meio do vão.

A variação dos modelos de ruptura observados podem ser relacionados também os resultados obtidos no ensaio de flexão. Nota-se que o CDP 3, que apresentou a menor resistência máxima, sofreu um tipo de ruptura diferente dos demais corpos de prova, indicando o impacto do defeito ou deficiência associada à ruptura na resistência do elemento.

Figura 53 – Fissuração dos CDPs de Concreto Armado

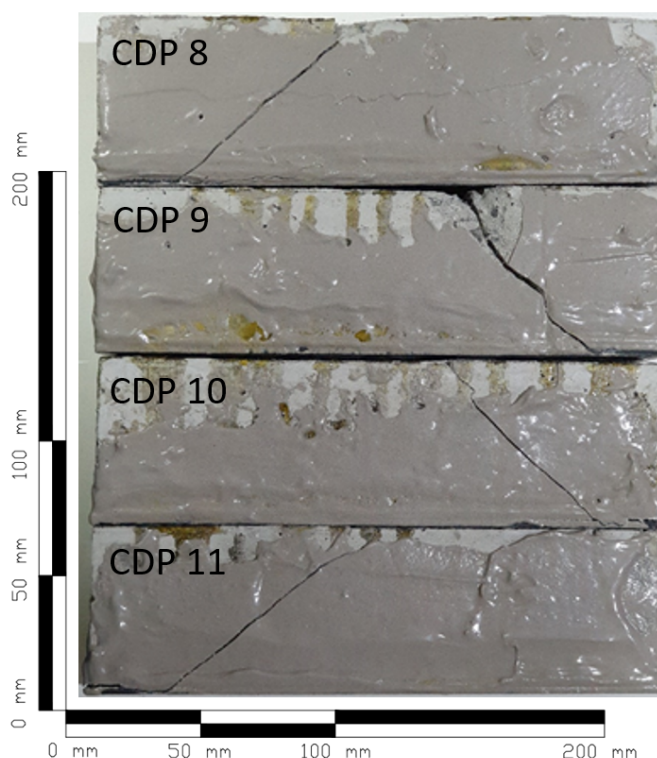


Fonte: Próprio do autor.

5.5.2 Vigas Híbridas

Analisando as fissuras nos corpos de prova das vigas híbridas, na Figura 54, observa-se um comportamento semelhante em todos os casos. Assim como nos CDPs 2 e 4, estes corpos de prova apresentaram ruptura devido à falta de ancoragem da armadura longitudinal e do compósito também. A falta de ancoragem do compósito é confirmada pelo descolamento da placa próximo ao apoio observado em todos os casos. Este tipo de ruptura indica que os reforços, de aço e de compósito, não acompanharam a deformação do concreto, não havendo aderência suficiente entre os elementos, ocorreu a separação dos mesmos, levando à ruptura isolada do concreto. Pode-se atribuir também a causa deste comportamento ao adesivo estrutural utilizado, que pode não ter transmitido os esforços de tração de forma efetiva ao compósito de fibra de carbono e acabou rompendo precocemente. De toda forma, comparando as fissuras em ambas as situações, percebe-se que o modelo de ruptura, em sua maioria, se manteve igual, mas com um grande acréscimo de tensão, indicando que o sistema também colaborou para minimizar o efeito da deficiência de ancoragem. Ou seja, apesar da ruptura pelo mesmo motivo, as peças suportaram uma carga muito maior antes de entrar em colapso, justificando a utilização do reforço PRFC.

Figura 54 – Fissuração dos CDPs Híbridos



Fonte: Próprio do autor.

5.6 COMPARAÇÃO ENTRE VIGAS COM E SEM REFORÇO DE PRF

A Tabela 9 compila os dados de carga obtidos para os corpos de prova sem reforço PRF (1 a 4) e com reforço PRF (8 a 11). É muito notável o acréscimo de carga gerado pela aplicação do reforço estrutural de polímero reforçado com fibra de carbono. Em valores médios, o sistema de reforço proporcionou um aumento de resistência de 146,62 %, ou seja, as vigas híbridas suportaram uma carga 2,5 vezes maior que as vigas sem reforço.

Tabela 9 – Comparação - CDPs Prismáticos de CA e Híbridos

Corpo de Prova Prismático	Força Máxima (kN)	Média (kN)	Acréscimo (%)
1	11,19	Sem PRF	146,62
2	11,19		
3	10,39		
4	12,31		
8	28,15	Com PRF	
9	24,69		
10	28,24		
11	30,08		

Fonte: Próprio do autor.

5.7 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS ANTERIORES

Por fim, é possível comparar os resultados obtidos neste trabalho com aqueles obtidos por Andrade em sua monografia, que estudou um sistema de reforço muito semelhante, com compósito de mesma resina, mas tecido de fibra de vidro (ANDRADE, 2017). Como todos os demais parâmetros utilizados foram idênticos em ambos os trabalhos, é possível realizar algumas considerações a respeito dos sistemas, principalmente entre os resultados obtidos para o ensaio de flexão dos materiais compósitos isoladamente.

O compósito de PRFV apresentou uma tensão máxima média de 706,82 MPa, enquanto o compósito de PRFC apresentou uma tensão máxima média de 3628,80 MPa, o que representa uma diferença de 413,40 %. A fibra de carbono é altamente reconhecida pela sua resistência, e uma diferença tão expressiva já era esperada.

Entretanto, as vigas híbridas com PRFV apresentou uma tensão máxima média de 14,93 MPa, enquanto as vigas híbridas com PRFC apresentou uma tensão máxima média de 19,73 MPa, o que representa um acréscimo percentual de 32,15 %, um valor muito inferior àquele encontrado quando comparado apenas os compósitos.

Isso se deve a diversos motivos, entre eles está o fato de que as propriedades do concreto não foram alteradas, ou seja, apesar do acréscimo de um reforço à tração, a componente sujeita à compressão não foi alterada e possui características similares em ambas as ocasiões. Outro possível motivo é a interface entre os materiais, como foi possível notar, em todos os casos das vigas híbridas de PRFC houve o descolamento da placa, sem danos aparente na placa em si, indicando que o principal motivo da falha foi devido ao adesivo estrutural não suportar a transmissão da carga, mesmo assim o ganho obtido foi muito expressivo, e demonstra a validade do sistema de reforço.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou a utilização de compósitos a base de fibra de carbono com resina epóxi como reforço estrutural de vigas de concreto armado. As vigas de concreto armado foram preparadas através da moldagem, utilizando traço obtido de referência bibliográfica (SILVA, 1975), em fôrmas de madeira com armadura de aço, com dimensões especificadas de acordo com a norma técnica. O compósito de fibra de carbono e resina epóxi foi preparado através da laminação de camadas de tecido pré-impregnado submetido a processo de cura em alta temperatura e pressão. O compósito foi inspecionado quanto a sua compactação e presença de defeitos por meio de ultrassom e, então, cortado em vigas de PRF com dimensões ajustadas para que fosse realizada a interface com as vigas de concreto armado. A interface entre os componentes foi realizada através da preparação da superfície do substrato, com o lixamento e jateamento da superfície, seguido da preparação com um primer, e então aplicação de adesivo estrutural e fixação do compósito. Foram realizados ensaios de flexão em vigas com e sem o reforço, visando observar o comportamento dos corpos de prova quando submetidos a tais tensões e então avaliado o acréscimo de resistência gerado pela adição do reforço. Foram obtidos também valores de referência através de métodos de dimensionamento, com o objetivo de considerar sua precisão frente aos resultados práticos.

Os resultados obtidos mostraram incremento substancial na capacidade de carga das estruturas de concreto armado após a utilização do sistema de reforço baseado em PRF. Em média, vigas de concreto armado sem reforço suportaram uma carga de aproximadamente 11,3 kN, equivalente a uma tensão de 9,39 MPa, enquanto as vigas de concreto armado reforçadas com o compósito de fibra de carbono suportaram 27,8 kN, equivalente a uma tensão de 19,73 MPa, demonstrando um acréscimo de 146,62 % na força resistida.

Em comparação com resultados obtidos em trabalho prévio com compósito semelhante com tecido de fibra de vidro, com resistência média de 21,02 kN, equivalente a uma tensão de 14,93 MPa, obteve-se um acréscimo de 32,15 % com o sistema de fibra de carbono, apesar da substancial diferença obtida do ensaio de flexão dos compósitos isolados, 706,8 MPa para o compósito de fibra de vidro e 3628,8 MPa para o compósito de fibra de carbono, uma variação de tensão equivalente a 413,40 %. A grande diferença não é refletida nos sistemas devido a parâmetros que foram mantidos, como a resistência do concreto e o adesivo estrutural (ANDRADE, 2017).

Com a comparação dos dados práticos com o dimensionamento teórico, observa-se que as vigas de concreto armado, sem reforço polimérico, obtiveram uma resistência 13,43 % maior que o esperado, enquanto as vigas híbridas obtiveram valores 33,96 % maiores. Com isso nota-se que ambos os métodos de cálculo são conservadores e prezam pela segurança, entretanto o dimensionamento com o compósito forneceu valores excessivamente altos, indicando que devem

ser realizados ajustes nos cálculos para um valor mais próximo à realidade.

Além disso, ressalta-se a importância dos métodos utilizados para realizar interface no sucesso do sistema de reforço deste trabalho. O cuidado nesta etapa se mostra como diferencial para garantir a maior integração e adesão entre o substrato de concreto e o reforço de compósito. Outro fator a ser ressaltado é o ciclo de cura determinado para a moldagem por compressão a quente do compósito, sendo determinante na máxima consolidação e melhor desempenho estrutural do mesmo

Dessa forma, o sistema estudado se mostrou eficiente como reforço em vigas de concreto armado, oferecendo um acréscimo de resistência considerável, bem como a validade dos métodos de cálculo e dimensionamento.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O tema deste trabalho poderia continuar sendo estudado através do projeto de novos sistemas de reforços com compósitos poliméricos utilizando diferentes fibras como a poliaramida, o basalto ou fibras naturais. Outro tema está relacionado ao custo associado à produção e execução destes sistemas de reforços, bem como o estudo da otimização dos processos realizados, especialmente relacionados à interface do compósito com a viga de concreto armado, buscando outras opções de adesivos estruturais ou até outras formas de ancoragem.

Outra possibilidade seria a utilização dos sistemas de reforços em outros elementos estruturais, como pilares, analisando o ganho estrutural proporcionado pelo compósito quando o elemento é submetido à compressão, ou até a utilização dos sistemas de reforços em elementos de diferentes materiais, como estruturas metálicas ou estruturas de madeira.

REFERÊNCIAS

- AECWEB. **Patologias do concreto**. 2016. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/content/rev/patologias-do-concreto_6160_10_0>. Acesso em: 06 nov. 2019.
- ALTOQI. **Dimensionamento de vigas à flexão simples**. 2010. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/268/651/pt-br/dimensionamento-de-vigas-a-flex%C3%A3o-simples.html>>. Acesso em: 06 nov. 2019.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **318-99/318R-99**: Building code requirements for structural concrete commentary. Farmington Hills, 1999. 369 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **440.2R-08**: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, 2008. 76 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6856 / D6856M**: Standard guide for testing fabric-reinforced "textile" composite materials. West Conshohocken, 2016. 8 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3878**: Standard terminology for composite materials. West Conshohocken, 2019. 7 p.
- ANDRADE, N. P. de. **Utilização de compósito de fibra de vidro/resina epóxi para reforço estrutural de vigas de concreto armado**. 2017. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. São Paulo, 2002. 28 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto — determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.
- AZUMA, F. et al. Inovação tecnológica: Técnicas e ferramentas aplicadas ao projeto de edificações. **Revista Produção**, v. 7, n. 3, 2007.
- BASTOS, P. S. dos S. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2006. 92 p.
- BASTOS, P. S. dos S. **Histórico e principais elementos estruturais de concreto Armado**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2006. 16 p.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 1. 490 p.

- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002. 844 p.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Editora Pini, 1997. 237 p.
- CLÍMACO, J. C. T. de S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2008. 410 p.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. Oxford: Oxford University Press, 1994. 432 p.
- FREITAS, L. B. de. **Reforço de vigas de concreto armado ao esforço cortante com chapas de aço coladas**. 1997. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.
- FURTADO, S. C. R. **Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- GÓMEZ, E. P. et al. Experimental study of the flexural behavior of timber beams reinforced with different kinds of FRP and metallic fibers. **Composite Structures**, Amsterdã, v. 213, p. 308 – 316, 2019.
- GONÇALVES, E. A. B. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. 2015. 174 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- HELENE, P. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1992. 113 p.
- HEXCEL. **HexPly® F155**. 2016. Disponível em: <https://www.heatcon.com/wp-content/uploads/2017/09/HCS2403-015_Hexcel-F155-71-TDS_Prepeg.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2019.
- INOVACIVIL. **Entenda os tipos de cimento e suas aplicações**. 2019. Disponível em: <<https://www.inovacivil.com.br/entenda-os-tipos-de-cimento-e-suas-aplicacoes/>>.
- MACHADO, A. de P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibra de carbono**. São Paulo: Viapol, 2017. 120 p.
- MAIDEL, B. et al. **Patologias das edificações**. 2009. 68 f. Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 218 p.
- MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo: Editora Pini, 2007. 270 p.
- MAZUMDAR, S. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. Flórida: CRC Press, 2002. 416 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. 674 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Perfil de brita para construção civil**. Brasília, 2009. 30 p.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais**: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 336 p.

NÚCLEOFIX. **Reforço estrutural**. 2015. Disponível em: <<http://www.nucleofix.com.br/reforco-estrutural.html>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

OLIVEIRA, D. F. **Levantamento de causas de patologias na construção civil**. 2013. 107 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PENDHARI, S. S.; KANT, T.; DESAI, Y. M. Application of polymer composites in civil construction: A general review. **Composite Structures**, Amsterdã, v. 84, n. 2, p. 114 – 124, 2008.

QIN, R.; ZHOU, A.; LAU, D. Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams. **Composites Part B: Engineering**, Amsterdã, v. 108, p. 200 – 209, 2017.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

ROCHA, A. C. et al. Ensaios de Stuttgart – reprodução em laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2004. p. 1 – 14.

SANTOS, A. M. dos. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SANTOS, R. E. dos. **A armação do concreto no Brasil**: história da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia. 2008. 338 f. Tese (Doutorado em Educação) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SCHOBER, K.-U. et al. FRP reinforcement of timber structures. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 97, p. 106 – 118, 2015.

SIKA. **Sikadur®-31**. 2009. Disponível em: <<https://irn.sika.com/dms/getdocument.get/777cbf5a-65c4-3d01-8db4-65a172415a7b/Sikadur%2031.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

SILVA, E. A. da. **Técnicas de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2006. 84 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2006.

SILVA, G. R. da. **Manual de traços de concreto**. São Paulo: Livraria Nobel, 1975. 142 p.

SILVA, R. V. da. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVEIRA, D. C. **Obtenção e caracterização de estruturas absorvedoras de micro-ondas baseadas em laminado de fibra de vidro/resina epoxy/véu de C/Ni**. 2016. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

SOARES, C. M.; MARTINS, J. G. **Reforço de estrutura de betão armado com CFR**. Porto: Universidade do Porto, 2006.

SOUZA, V. C. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1998. 255 p.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de concreto: concreto armado**. Porto Alegre: Editora Globo, 1987. v. 1. 376 p.

TECHNIQUES. **Reforço estrutural com fibra de carbono**. 2013. Disponível em: <<https://techniques.com.br/fibra-de-carbono/>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

TECHNIQUES. **Reforço estrutural em concreto**. 2013. Disponível em: <<http://techniques.com.br/reforco-estrutural-em-concreto/>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

THOMAZ, E. C. S. **Fissuração - 168 casos reais**. 2003. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/fissuracao/Coletanea_Fissuracao_Eduardo_Thomaz.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2019.

TOMASI, A. P. N. A modernização da construção civil e os impactos sobre a formação do engenheiro no contexto atual de mudanças. **Educação & Tecnologia**, Belo Horizonte, v. 10, n. 2, p. 39 – 45, 2005.

TRINDADE, D. dos Santos da. **Patologia em estruturas de concreto armado**. 2015. 88 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n. 3-4, p. 10 – 19, 2009.

VIAPOL. **Viapol Carbon CFW 300**. 2017. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/212531/ft-viapol-carbon-cfw-300-12-06-2017.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

ZAMAN, A.; GUTUB, S. A.; WAFA, M. A. A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Thousand Oaks, v. 32, n. 24, p. 1966 – 1988, 2013.

ZHU, H. et al. Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 161, p. 587 – 597, 2018.

ZUCCHI, F. L. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais**. 2015. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.