



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOAO FELIPE SOARES GOMES

**ESTUDO TEÓRICO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
REFORÇADAS À FLEXÃO E AO CISALHAMENTO ATRAVÉS DO
USO CFRP**

FORTALEZA

2021

JOAO FELIPE SOARES GOMES

**ESTUDO TEÓRICO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
REFORÇADAS À FLEXÃO E AO CISALHAMENTO ATRAVÉS DO
USO CFRP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Ari
de Sá.

Orientador: Prof. Me. Ésio Magalhães Feitosa

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Faculdade Ari de Sá
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G633e Gomes, João Felipe Soares.

Estudo teórico de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento através do uso CFRP / João Felipe Soares Gomes. – 2021.

56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Ari de Sá, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Me. Écio Magalhães Feitosa.

1. Reforço Estrutural. 2. Vigas de Concreto Armado. 3. Reforço à Flexão CFRP. 4. Reforço ao Cisalhamento CFRP. I. Título.

CDD 620

JOAO FELIPE SOARES GOMES

**ESTUDO TEÓRICO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS À
FLEXÃO E AO CISALHAMENTO ATRAVÉS DO USO CFRP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Ari
de Sá.

Orientador: Prof. Me. Ésio Magalhães Feitosa.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Ésio Magalhães Feitosa
Faculdade Ari de Sá

Prof. Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro
Faculdade Ari de Sá

João Paulo Fernandes – Engenheiro Estrutural
Faculdade Ari de Sá

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida, por ter nos dado força para superar as dificuldades e continua à nossa trajetória acadêmica em um novo tempo normal.

Aos meus pais, e famílias.

À minha querida esposa Carla Lidiana Carneiro de Sousa, pelo apoio e companheirismo que está sempre me impulsionado para novas conquistas.

Ao meu professor orientador Ézio Magalhães Feitosa Lima, por aceita esse convite e pela seus ensinamentos ao longo da graduação.

À Faculdade Ari de Sá pela prontidão e aos professores pela disponibilidade e atenção.

Aos meus amigos, companheiros de estudos, que fizeram parte da minha formação.

A todos aqueles que participaram, de forma direta ou indiretamente, para minha formação e do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu aprendizado.

RESUMO

GOMES, J. F. S. **Estudo teórico de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento através do uso CFRP**. 2021. 56f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2021.

O surgimento de novas tecnologia tem sempre como regra superar uma série de problemas. O aço e o concreto também sofreram, tempos atrás, o mesmo destino e, depois de longas séries de projetos-pilotos, pesquisas internacionais e artigos publicados, passara a ganharam um lugar entre os materiais mais utilizados na construção civil. A busca por materiais compósitos para reforço de vigas de concreto armado, tem crescido notadamente no cenário mundial, visto que, esses materiais apresentam elevada resistência mecânica, e são fáceis de serem manuseados, tornando-se uma solução viável tecnicamente. A necessidade de se reforça um elemento estrutural ocorre aparte do momento em que a peça estrutural não é mais capaz de suportar seus carregamentos, carga oriundos por aumento de carga sobre a estrutura ou por falta de manutenções periódicas. Este trabalho teve como objetivo geral, realiza uma revisão bibliográfica acerca de estudos de reforço em vigas de concreto armado submetida aos esforços à flexão e ao cisalhamento mediante ao material compósito de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono). Desse modo, foi realizado uma revisão literária em trabalho conceituado e comparados em relação às vantagens e desvantagens, buscado também apresentar através resumo simplifica os métodos de aplicação da técnica CFRP, que consiste, no método EBR (Reforço Colagem Externamente), e o método NSM (Reforço aplicado através de ranhuras no cobrimento). De acordo com as prescrições normativa ACI 440.2R:2017.

Palavras-chave: Reforço Estrutural. Vigas Concreto Armado. Reforço à Flexão CFRP. Reforço ao Cisalhamento CFRP.

ABSTRACT

GOMES, J. F. S. **Theoretical study of reinforced concrete beams reinforced to bending and shear through CFRP use.** 2021. 56f. Monograph (Graduation in Civil Engineering) - Ari de Sá College, Fortaleza, 2021.

The emergence of new technology always has as a rule overcome a number of problems. Steel and concrete also suffered, long ago, the same fate and, after long series of pilot projects, international research and published articles, had gained a place among the most used materials in civil construction. The search for composite materials for reinforcement of reinforced concrete beams has grown noddedly on the world stage, since these materials have high mechanical strength, and are easy to handle, making it a technically feasible solution. The need to reinforce a structural element occurs apart from the moment when the structural part is no longer able to withstand its loads, load arising from increased load on the structure or lack of periodic maintenance. This work, which, as a general objective, conducts a literature review on reinforcement studies in reinforced concrete beams submitted to bending and shear efforts through the composite material of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers). Thus, a literary review was carried out in a reputable work and compared in relation to the advantages and disadvantages, also sought to present through summary simplifies the methods of application of the CFRP technique, which consists, EBR method, (Externally Bonding Reinforcement) and the NSM method (Reinforcement applied through grooves in the cover). According to the normative prescriptions ACI 440.2R:2017.

Keywords: Structural Reinforcement. Reinforced Concrete Beams. CFRP Bending Reinforcement. CFRP Shear Reinforcement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Reforço de vigas com chapas de aço coladas	19
Figura 2-Reforço de vigas através do aumento da seção.....	20
Figura 3-Reforço de vigas de concreto armado com utilização de perfis metálicos	21
Figura 4- Reforço de vigas com a utilização de perfis metálicos	22
Figura 5- Materiais fibrosos disponível no mercado	23
Figura 6- Representação das fases constituintes de um compósito	23
Figura 7- Diagrama tensão-deformação de fibras e metais	25
Figura 8 - Viaduto de Santa Teresa em Belo Horizonte - MG.....	27
Figura 9- Abrindo pontos de aderência na superfície.....	29
Figura 10- Aplicação do método EBR	29
Figura 11- Aplicação do método NSM.....	30
Figura 12- Comparativo das técnicas de reforço FRP	30
Figura 13- Ruína através do escoamento do Aço e ruptura FRP.....	32
Figura 14- Escoamento do aço seguido esmagamento do concreto	33
Figura 15- Ruína por esmagamento do concreto.....	33
Figura 16- Ruína por cisalhamento	34
Figura 17- Ruína por deslocamento do reforço	34
Figura 18- Ruptura na região do cobrimento.....	35
Figura 19- Ruína por descolamento adesivo-concreto	35
Figura 20- Fator de redução em função da ductilidade da peça	39
Figura 21- Distribuição de tensões e equilíbrio de forças internas de uma seção retangular reforçada com PRFC	40
Figura 22- Esquema de reforço ao cisalhamento através uso CFRP	45
Figura 23- Esquema de posicionamento para dimensionamento ao cisalhamento com CFRP	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades de fibras de vidro, aramida, carbono e aço	26
Tabela 2- Fator de redução ambiental para diferentes condições de exposição	38
Tabela 3 - Valores de β_1 em função $f'c$	42
Tabela 4- Níveis seguros de tensões cíclicas	44
Tabela 5- Fatores adicionais de redução para o reforço com fibra de carbono PRFC	47

LISTA DE SIGLAS

ACI	American Concrete Institute
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
EMPA	Laboratório Suíço de Materiais
EBR	Externally Bonded Reinforcement
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
NSM	Near Surface Method

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ	Fator de redução da resistência do CFRP
$f'c$	Resistência característica à compressão do concreto
t_f	Espessura de cada camada do reforço
N	Número de camadas do reforço
E_f	Módulo de elasticidade do CFRP
ε_{fu}	Deformação de ruptura de cálculo da fibra
ε_{fd}	Deformação limite de cálculo CFRP
$\varepsilon_{s,y}$	Deformação de escoamento da armadura
ε_t	Deformação unitária líquida de tração no aço
M_u	Momento solicitante ponderado
M_n	Momento fletor resistente do cálculo
M_s	Momento fletor para as cargas não majoradas.
ε_{fe}	Deformação pré-existente quando da instalação do reforço CFRP
d_f	Profundidade efetiva do reforço CFRP
ε_{cu}	Máxima deformação admitida no concreto comprimido
ε_{bi}	Deformação existente no substrato, no momento de aplicação do reforço
ε_s	Nível de deformação no aço
C	Distância da fibra comprimida mais distante a linha neutra
f_{yk}	Tensão característica de escoamento do aço
E_s	Módulo de elasticidade do aço
A_s	Área da armadura de tração da seção
f_s	Tensão de tração no aço
D	Altura útil da seção
d_f	Altura total da seção
β_1	Fator de transformação do diagrama de tensões
C	Posição da linha neutra
ψ_f	Coefficiente de minoração da resistência do FRP, para esforço flexão
A_f	Área de FRP
A_{fe}	Tensão de tração efetiva
A_{cg}	Área bruta da seção transversal da peça
M_s	Momento provocado por todas as cargas
$f_{f,s}$	Nível de tensão no reforço PRFC sob condições de serviço
$f_{s,s}$	Tensão de escoamento aço
Kd	Profundidade da linha neutra em serviço
V_n	Força cortante resistente característico
V_u	Força cortante última solicitante de cálculo
V_c	Resistência do concreto ao corte
V_s	Resistência da armadura transversal
V_f	Resistência ao cisalhamento do CFRP
α	Ângulo entre as tiras inclinadas e o eixo longitudinal da viga
f_{fe}	Tensão efetiva no CFRP

S_f	Espaçamento entre tiras medido paralelamente ao eixo da viga
d_{fv}	Altura útil do CFRP
w_f	Largura do compósito CFRP
t_f	Espessura do compósito
k_v	Coefficiente redução de ligação
b_w	Largura da base da viga

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVAS.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
2 METODOLOGIA.....	17
3 REFORÇO ESTRUTURAL.....	18
3.1 REFORÇO COM CHAPAS DE AÇO COLADAS NO SUBSTRATO DE CONCRETO ARMADO.....	19
3.2 AUMENTO DA SEÇÃO DE CONCRETO ARMADO.....	20
3.3 REFORÇO COM PERFIS METÁLICOS ADERIDO COM EPÓXI.....	21
3.4 REFORÇO COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA (FRP).....	22
3.4.1 Compósitos.....	23
3.4.2 Fibras.....	24
3.4.3 Fadiga FRP.....	26
3.5 REFORÇO COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO (CFRP).....	26
3.5.1 Externally Bonded Reinforcement (EBR).....	28
3.5.2 Near Surface Method (NSM).....	29
3.5.3 Mecanismos de ligação.....	31
3.5.4 Modos de Ruptura.....	31
3.6 REFORÇO DE VIGA À FLEXÃO ATRAVÉS DO USO CFRP, DE ACORDO COM ACI 440.2R:2017.....	35
3.6.1 Dimensionamento de Vigas reforçada à Flexão com CFRP.....	36
3.6.1.1 Modos de falhas.....	37
3.6.1.2 Fator de redução da resistência do CFRP à flexão (ϕ).....	38
3.6.1.3 Verificação do estado limite último.....	39
3.6.1.4 Verificação do estado limite serviço.....	43
3.6.1.5 Verificação da ruptura por fluência ou fadiga.....	44
3.7 REFORÇO DE VIGA AO CISALHAMENTO COM CFRP DE ACORDO COM ACI 440.2R:2017.....	44
3.7.1 Dimensionamento de Viga Reforçada ao Cisalhamento com CFRP.....	45
3.7.1.1 Contribuição do CFRP na resistência à força cortante.....	47
3.7.1.2 Deformação efetiva do CFRP.....	48
3.7.1.3 Limites dos reforços.....	49
3.7.1.4 Espaçamento das lâminas de reforço ao cisalhamento.....	50
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O reforço através de materiais poliméricos em estrutura de concreto armado, vem crescendo consideravelmente no cenário da construção civil, visto que esses materiais apresentam elevada resistência, alto módulo de elasticidade, um bom comportamento à fadiga, e baixo peso específico, e são fáceis de serem manuseados, tornando-se uma solução viável tecnicamente.

Deste então, os compósitos passaram a ganhar espaço como alternativa viável para reforço de estruturas de concreto armado, de fato a combinação de dois ou mais materiais destinto, permite que o elemento de reforço seja confeccionado para atender a uma solução particular, tanto em relação à sua geometria quanto as suas propriedades (BEBER, 2003).

Os materiais compósitos reforçados com fibra surgiram como alternativa para os casos em que emprego dos materiais tradicionais, aço e concreto, não forem adequados. Em meados da década 90, o alto custo inicial de produção dos materiais poliméricos e a falta de suficientes pesquisas e informações técnicas limitavam a frequência do uso destes compósitos na construção civil (SILVA, 2016). No entanto, com o desenvolvimento de estudos no campo dos (Compósitos Reforçados com Fibras) e por meio da maior facilidade de aquisição do material frente à redução dos custos, com o passar do tempo, passou-se a ter mais acessibilidade e a empregabilidade desses materiais em reforço de estrutura de concreto armado.

Nos últimos anos, com aumento na busca de uma técnica viável para reforço estrutural, diversos centro de pesquisa buscava por meio de estudos o aperfeiçoamento em novas alternativas para empregos reforço onde os materiais tradicionais (aço e concreto), não foram adequados. Entretanto uma das técnicas inovadoras mais recente que vem se destacando como reforço de estruturas de concreto armado é o Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), traduzido em português (Polímeros Reforçado com Fibras de Carbono). Visto que esse compósito apresenta propriedades mecânicas adequadas e são de fácil aplicação, o que favoreceu sua popularização no mercado de reforço estrutural. Diferentemente do aço, os polímeros de fibras de carbono não são afetados pela corrosão e resistem aos efeitos corrosivos, e outros agentes agressivos (SILVA, 2016).

Segundo Menon (2008) através de pesquisa realizado pelo (Laboratório Suíço de materiais), EMPA em Zürich pelo Professor Urs. Meier, foi submetido os primeiros ensaios para comprovar a possibilidade da utilização do reforço através do (CFRP). Em 1991 executou-se a primeira obra real. Reforçou-se a ponte Ibach em Lucerna (Suíça). A execução era uma das

etapas, em processo experimental, desde então, centenas de estruturas de concreto armado foram reforçadas através da composição CFRP, e muitas delas monitoradas para fornecerem dados relativos ao desempenho estrutural dessa técnica com passar do tempo.

No Brasil, em 1998, foi realizado primeiro reforço através do compósito de fibra de carbono, reforçando o viaduto Santa Tereza, construída entre anos de 1925 e 1927, situada no estado Minas Gerais, mais especificamente na capital Belo Horizonte, um dos motivos levaram a realização dessa técnica, por se trata de obra tombada pelo patrimônio histórico, e por seus aspetos estéticos (ARQUEZ, 2010).

Dentro dos métodos de aplicação do CFRP, em geral uns dos mais empregado na construção civil, sendo denominada como uso tradicional, é Externally Bonded Reinforcement (EBR), A sua aplicação se dá pela colagem das fibras externamente ao elemento reforçado, sendo comum a utilização de materiais compósitos na forma de mantas ou tecidos. Entre os modos de aplicação existe outra técnica que é denominada Near Surface Mounted (NSM), diferentemente da técnica (EBR), essa técnica diferencia-se do uso tradicional do CFRP, pois nela laminados ou barras de CFRP são inseridos no concreto por meio de ranhuras cravadas longitudinalmente na superfície, preferencialmente na região de cobrimento. Esse material é fixado com a utilização da mesma resina aplicada na técnica anterior, a qual também é utilizada para preencher a ranhura após a instalação do reforço (PRADO, 2016).

Segundo Ferrari (2007), uma das deficiências causada pela técnica de reforço através dos compósitos de fibras de carbono, em estruturas de concreto armado. Apesar de ser caracterização não recente, tem sido comprovada por meio de diversos estudos experimentais e pesquisas, que a grande maioria destes estudos, tem-se observado a ocorrência de ruína prematura do reforço caracterizada pelo seu desprendimento. De acordo Prado (2016), outros motivos que vem sendo discutido, é relação custo, que chega a ser de 40% a 50% maior que outros tipos de reforço oriundos, colagem de chapas metálicas, encamisamento ou aumento de seção, e reforço através de perfis metálicos. Porém, essa comparação não pode levar em conta apenas o custo dos materiais, mas também os custos operacionais que envolvem cada um dos métodos (DRUN; FAVERSANI, 2016).

O reforço de peças de concreto armado através CFRP, independentemente do método empregado, tem se tornado cada vez mais acessível. Porém em muitos países assim como no Brasil, ainda não existe uma norma específica que regulamente o reforço com CFRP, tanto na forma de tecido quanto de laminado. Por tanto os profissionais têm que recorrer às normas

estrangeiras (American Concrete Institute ACI 440.2R:2017), mais recomendado desde então (MENON, 2008).

1.1 JUSTIFICATIVAS

Toda e qualquer estrutura de concreto armado sofre perda de rendimento ao longo do tempo. Independentemente do motivo, toda estrutura tem uma vida útil. Os reparos e reforços surgem com a finalidade de prolongar sua durabilidade, de modo que possam ser reforçados e mantendo, sem precisarem ser substituídas por estruturas novas.

Diversos métodos de reforço ou readequação de vigas de concreto armado já tiveram a sua eficiência comprovada. Dentre estes, destacam, a utilização de chapas de aço aderidas à superfície do concreto, aumento da seção de concreto com adesão de armaduras, e a utilização de perfis metálicos, entre outro. Desde então, estudos e pesquisa estão sendo desenvolvidos buscando o aperfeiçoamento da técnica de reforço através da utilização materiais poliméricos (SILVA, 2016). Nesse caso, materiais que permitam a execução de um reforço rápido, limpo com elevada resistência mecânica, e grande desenvoltura que não interfira significativamente nas dimensões do elemento estrutural.

Considerando a importância de se conhecer novas técnica de reforço em vigas de concreto armado, através CFRP, o presente trabalho terá como objetivo, análise estudos teóricos desenvolvido em literaturas, por meio de pesquisas, a utilização de compósito de fibra de carbono com foco no aumento da capacidade resistente de vigas de concreto armado submetidas à esforços de flexão e ao cisalhamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral, realizar uma revisão bibliográfica acerca do comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento através do uso CFRP.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar dados e resultados de ensaios experimentais em vigas reforçada à flexão e ao cisalhamento com fibras de carbono.
- Fazer breve descrição do método de aplicação existente, para reforço de vigas de concreto armado com CFRP;
- Fazer descrição processo de dimensionamento através das prescrições normativa ACI 440.2R:2017 para o reforço de vigas com uso CFRP;
- Analisar os modos de rupturas a partir dos esforços, submetidos.

2 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho é baseada em uma revisão bibliográfica em trabalhos conceituados que consiste em dissertação artigos e monografia descritiva, (BEBER, 2003; MACHADO, 2002; MENOR, 2008; COELHO, 2011; MACHADO, 2015; SILVA, 2016; PINTO, 2018 etc...), terá uma associada à exemplos de aplicação do método por meio de fibra de carbono, com breve descrição nas origens dos compósitos, que tem a formação de matéria com elevada resistência. Com foco no aumento da capacidade resistente de vigas de concreto armado submetidas à esforços de flexão e ao cisalhamento.

Para esse estudo o plano metodológico do presente trabalho consistiu em duas etapas principais. A primeira etapa foi de elaboração do banco de dados com informações recolhidas da literatura e de fontes seguras disponível sobre vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com CFRP (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono). A segunda etapa consistiu na descrição do processo de dimensionamento para reforço de vigas de concreto armado por meio de colagem externa EBR (Externally Bonded Reinforcement). Seguindo as orientações normativas ACI 440.2R:2017 (American Concrete Institute) e ACI 318:2014.

3 REFORÇO ESTRUTURAL

Segundo Ferrari (2002), o reforço pode ser definido como o aumento da capacidade resistente de um elemento estrutural. Entretanto é importante que este conceito não seja confundido ou mal interpretado, com a definição de reparo ou recuperação estrutural. O reparo está ligado a correções localizadas de problemas patológicos e a recuperação estrutural está ligada a readequação da utilização através da correção generalizada de patologias apresentadas na estrutura.

Naturalmente, os métodos mais utilizados para o reforço localizado de elementos estruturais, são aqueles mais economicamente viáveis. Dentre estes, o que mais se destacam, são o aumento da seção de concreto armado com adesão de barras de aço, a utilização de chapas de aço coladas na superfície do concreto, a utilização de perfis metálicos e o reforço com a utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP). Em contrapartida, a maioria dos métodos de reforço, não atende algumas exigências pré-determinadas como a manutenção das dimensões do elemento ou a velocidade de execução durante o processo de reforço (SILVA, 2016).

A aplicação de reforço estrutural em peças de concreto armado vem cada vez mais sendo utilizada no mercado da construção civil.

Segundo Machado (2002), existem várias causas que leve aplicação dessa técnica, dentre elas são:

- Aumento do carregamento devido às sobrecargas acidentais elevadas;
- Aumento das cargas móveis, instalação de máquinas pesadas, excesso de vibração;
- Danos nos elementos estruturais devido ao envelhecimento/deterioração dos materiais, corrosão das armaduras;
- Impacto de veículos e ocorrência de sinistros;
- Limitação de flechas e/ou limitação das aberturas das fissuras;
- Erros de projeto ou construção em virtude de um dimensionamento ou execução incorretos do elemento estrutural.

A maioria das causas apresentada acima, passa a gerar manifestações patológicas na edificação, diante disso, Machado (2002), afirma que as deficiências de execução e de projeto somam mais de 50 % das principais origens dos problemas patológicos em uma estrutura. Deste

modo, as manifestações patológicas e à estrutura original devem ser bem estudadas para a aplicação da melhor forma de reforço (PIVATTO, 2014).

Antes de se estudar os métodos de recuperação de vigas é fundamental conhecer seu comportamento perante os esforços atuantes sobre elas, para assim compreender as causas das patologias existentes e aplicar o método de reforço que melhor se adequa a cada situação.

A decisão da técnica que irá ser implementada para reforço estrutural, depende de alguns fatores (REIS, 2001).

Qualquer técnica adotada requer como pressupostos principais do projeto a identificação das possíveis soluções, de forma a obter um sistema coerente com o ambiente em que se insere a estrutura, respeitando-se o partido arquitetônico, e balanceando-se quanto aos aspectos relativos aos custos. Devem ser observadas as recomendações existentes para o dimensionamento, os procedimentos para a execução, o controle da qualidade do processo, permitindo inclusive a inclusão de técnicas de monitoramento das estruturas. Considerações quanto à condição de reforço máximo e condições impostas pela capacidade global da estrutura, devem ser observadas (REIS, 2001, p. 79).

3.1 REFORÇO COM CHAPAS DE AÇO COLADAS NO SUBSTRATO DE CONCRETO ARMADO

O reforço realizado através de chapas de aço com resina epóxi ou com fixadores (parabolts), já tivera sua eficiência comprovada, desde que seja bem executada, é uma alternativa viável para reforço à flexão. Apresenta-se como solução de baixo custo, com a introdução de pequenas alterações na seção do elemento reforçado e com pequena interferência arquitetônica. Para isso, é importante que seja empregada uma resina de boa qualidade e que as superfícies do concreto e do aço sejam convenientemente preparadas.

Figura 1- Reforço de vigas com chapas de aço coladas



Fonte: (ZR Engenharia - Construção Civil - Projetos Estruturais e Fachadas - HOME)

Esse tipo de reforço consiste na criação de um elemento estrutural composto por concreto-resina-aço, que proporcione um aumento de resistência da peça a partir do posicionamento adequado das chapas de aço na seção de concreto armado existente. (SILVA, 2016). É de suma importância antes mesmo da execução desse tipo de técnica ou qualquer outro, é conveniente que o elemento esteja parcial ou totalmente descarregado para possibilitar a recuperação das deformações elásticas pré-existentes.

Segundo Shehata; Teixeira (1997), apontaram algumas desvantagens do método utilizado, que se dá pelo alto grau de dependência do preparo superficial da chapa e do concreto, a necessidade de cura mínima da cola por sete dias, o que retarda a agilidade da solução, e a possibilidade de ocorrência de corrosão interna da chapa de aço, sem que seja notada, por conta do cobrimento do método empregado.

3.2 AUMENTO DA SEÇÃO DE CONCRETO ARMADO

O reforço realizado por aumento de seção é uma prática bastante utilizada no mercado de reforço estrutural, é uma técnica que tem grande aceitação, por contém na sua constituição um dos materiais mais usado na construção civil, o (Concreto e Aço). Entretanto apresenta como desvantagens, a interferência na arquitetura.

Uma situação típica de utilização desse reforço é evidenciada pelo aumento da seção transversal de vigas o que, conseqüentemente, aumenta a seção resistente do elemento. Dessa forma, aumenta-se a zona de concreto comprimida e, conseqüentemente, aumenta-se o braço de alavanca do momento resistente Silva (2016). Essa técnica é bastante eficiente, de rápida execução e, geralmente, de baixo custo sendo o seu emprego muito utilizado para reabilitações de estruturas danificadas por falta de manutenção, até mesmo erro de execução. As figuras a seguir representa dos métodos construtivos, desde a inserção de novas armaduras, e sua fixação.

Figura 2-Reforço de vigas através do aumento da seção



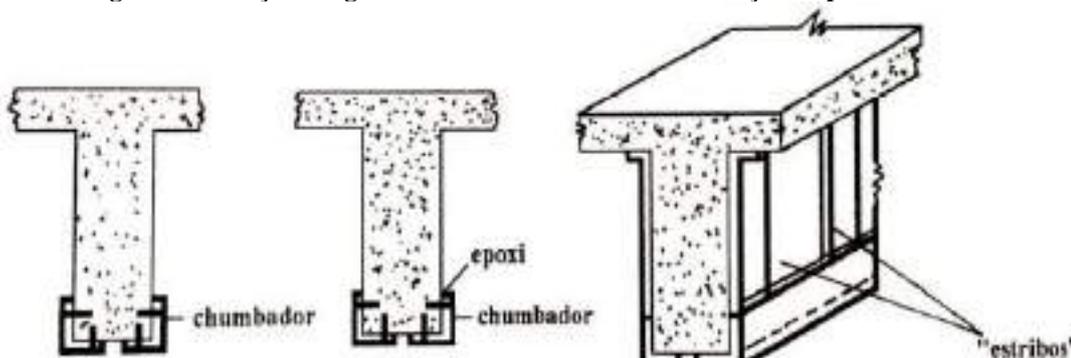
Fonte: (solidus.cc/reforço-estrutural/)

O sucesso da recuperação depende da boa aderência entre o concreto novo e o velho e da capacidade de transferência de tensões entre eles. No entanto, é necessário que a seção de ligação tenha capacidade de resistir às tensões de deslizamento existentes, o que pode ser assegurado através da execução de serviços preliminares, criação de aderência na superfície do concreto existente, limpeza superficial (SILVA, 2016).

3.3 REFORÇO COM PERFIS METÁLICOS ADERIDO COM EPÓXI

A técnica de reforço com o uso de perfis metálicos do tipo cantoneira configura-se como um dos métodos mais tradicionais, comumente usados em situações emergências. Não apresenta em geral, grandes alterações na geometria das peças, sendo colocados mediante chumbamento com buchas expansivas e preenchimento com resinas epoxídica. De acordo com Souza e Ripper (1998), o reforço de vigas com a utilização de perfis metálicos, pode ser feito de acordo com os três modos apresentados na Figura 3, considerando, para todos eles, o descarregamento prévio da estrutura.

Figura 3-Reforço de vigas de concreto armado com utilização de perfis metálicos



Fonte: Adaptada (SOUZA; RIPPER, 1998)

A preparação da superfície é importante, devendo ser dada especial atenção à perfeita junção entre o reforço e o elemento estrutural em questão. O primeiro modo apresentado na Figura 4 refere-se ao reforço à flexão através da fixação de perfis metálicos à viga de concreto com chumbadores. Esse conjunto deve ser dimensionado como uma estrutura mista de concreto e aço, que confere uma maior resistência à peça na medida em que o braço de alavanca dos esforços resistentes aumenta. Os chumbadores devem ser dimensionados para corte puro devendo o seu espaçamento máximo e folga de furação estar em conformidade com o perfil utilizado (SILVA, 2016).

A figura 4 a seguir ilustra ensaios de vigas de concreto armado reforçada com perfis metálicos do tipo cantoneiras abas iguais, com chumbamento com resina epoxídica. Tem como objetivo aumentar a capacidade à flexão.

Figura 4- Reforço de vigas com a utilização de perfis metálicos



Fonte: Adaptada (NASCIMENTO, 2017)

3.4 REFORÇO COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA (FRP)

Os polímeros reforçados com fibras (Fiber Reinforced Polymer - FRP), representado em inglês, vêm sendo utilizados desde 1940 nas indústrias aeroespacial, automotiva e naval. No entanto, na área da engenharia civil, as primeiras aplicações ocorreram apenas em 1984, no EMPA, na Suíça. Na época, uma equipe liderada pelo Professor Urs Meier iniciou ensaios de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, buscando uma alternativa de reforço que apresentasse vantagens em relação ao método tradicionais, como reforço com chapas de aço coladas (MENEGHETTI, 2007).

O reforço através polimérico reforçado com fibras FRP vem despertando grande interesse como alternativa viável e se justifica, principalmente, devido às suas características físicas, químicas e mecânicas. São materiais com elevada resistência à tração, com módulos de elasticidade adaptáveis aos critérios de projeto, possuem neutralidade eletromagnética, resistência à corrosão e baixo peso próprio.

Os polímeros reforçados com fibras (FRP) são materiais formados pela combinação de uma matriz polimérica, e fibras contínuas e, por alguns aditivos. As fibras são responsáveis pela resistência do compósito e a matriz é o produto que as une, sendo responsável pela transmissão das solicitações externas por meio de tensões tangenciais.

Atualmente, sistemas de FRP podem ser adquiridos de diversos fabricantes e fornecedores, em diferentes formatos, com ampla variação do tipo e orientação das fibras (Fib, 2001). Estes sistemas são comercializados em diversas formas, tais como (tecidos – uni,

bidirecional), barras, laminados e mantas pré-impregnadas. Na figura 5 estão ilustradas várias formas de produtos comerciais.

Figura 5- Materiais fibrosos disponível no mercado

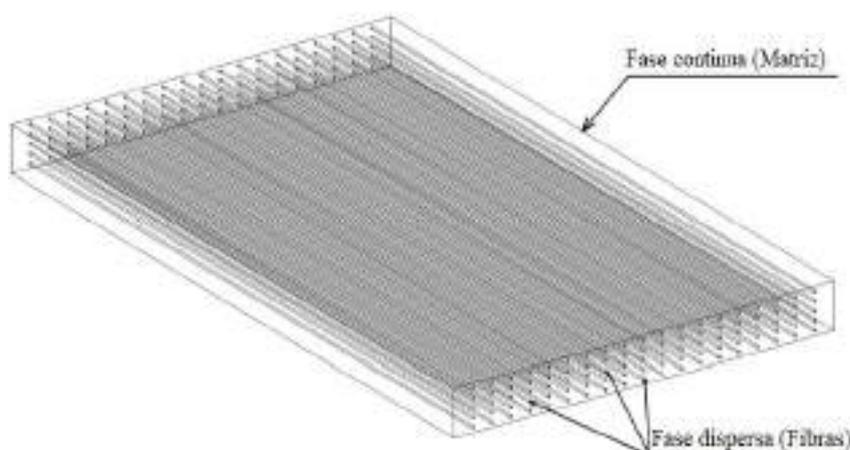


Fonte: Adaptada (SIKA, 2016)

3.4.1 Compósitos

Os compósitos são constituídos essencialmente por duas fases, conforme ilustra a Figura 6. Uma das fases, são constitui pala as fibras, que apresenta uma grande resistência, elevado módulo de elasticidade e tem a forma de filamentos de pequeno diâmetro. A outra fase, tem características sinérgicas, que gera a união entre dois ou mais materiais, que é denominada como matriz, por sua vez, a matriz possui menos rigidez e resistência, ela é a responsável por garantir a proteção das fibras de agentes agressivos, permitindo boa transferência local de tensões entre as próprias fibras, passado a gera uma elevada resistência mecânica as compósitos (SOARES, 2017).

Figura 6- Representação das fases constituintes de um compósito



Fonte: Adaptada (COSTA,2018)

Segundo Soares (2017), existem variados tipos de matriz, as mais utilizadas em polímeros reforçados com fibras são as matrizes poliméricas, podendo ser do tipo termoendurecíveis, poliamidas e polyester, ou do tipo termoplásticas. Notadamente as resinas do tipo termoendurecíveis ou epoxídica, vem sendo bastante utilizada por apresentar excelentes propriedades de aderência e durabilidade, as quais são derivadas do petróleo (etoxileno). Além disso, tem grande resistência à tração, boa resistência à fluência e baixa retração durante a cura. Outra grande vantagem desse material é sua resistência a grandes variações de temperatura (JUNIOR, 2008).

3.4.2 Fibras

Os tipos de fibras empregados para estruturar os FRP são as fibras de vidro, carbono e aramida. Existem também registros de emprego, em escala bem reduzida, de fibras de boro, sílica, tungstênio, basalto e berílio (MENEGETTI, 2007).

De acordo com o tipo de fibra empregado na formação do compósito, a nomenclatura global utilizada para designar o compósito pode variar, como segue.

- Compósitos com fibras vidro (Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP);
- Compósitos com fibras aramida (Aramid Fiber Reinforced Polymer - AFRP);
- Compósitos com fibras carbono (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP).

Para o presente estudo, serão discutidas apenas as características relacionadas as fibras de carbono.

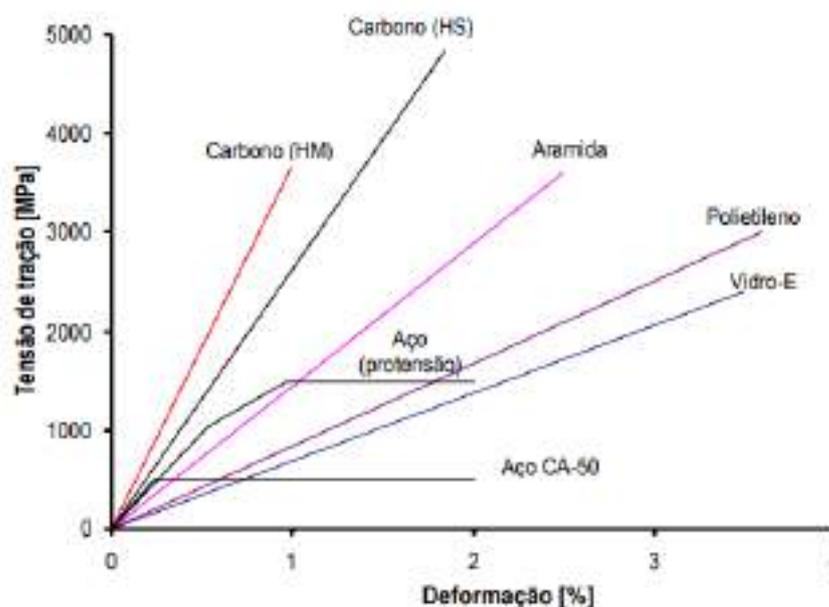
Segundo Schwartz (1984) as fibras de carbono são originadas a partir do tratamento térmico de outras fibras como a poliacrilonitrila (PAN), rayon e piche. As fibras de carbono produzidas a partir do rayon, possuem alta resistência e alto módulo de elasticidade, porém o alto custo do processo produtivo e a dificuldade em obter a matéria-prima faz com que esse tipo de fibra fosse inviável. O piche é uma matéria-prima mais acessível, porém gera fibras que possuem baixa resistência e baixo módulo de elasticidade. Entretanto, as fibras produzidas a partir do PAN conquistou o mercado por agregar um baixo valor de produção e alcançar boas propriedades físicas (BEBER, 2003).

As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso próprio, alta resistência, alta rigidez, facilidade de assumir diferentes formas e grande durabilidade. Este é um tipo de material baseado nas fortes ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de

carbono. A sua alta resistência e alto módulo de elasticidade se devem ao paralelismo entre os eixos das fibras e os seus diâmetros podem variar entre 0,07 mm e 0,10 mm, podendo ser fabricadas continuamente, sem limite de comprimento (MACHADO, 2002; BEBER 2003).

As fibras de carbono possuem um comportamento linear elástico o que caracteriza uma ruptura frágil e brusca, deve-se sempre procurar mecanismos que evitem este tipo de ruína (BEBER, 2003; ACI 440.2R, 2017). Tal comportamento pode ser observado no gráfico representado na Figura 7.

Figura 7- Diagrama tensão-deformação de fibras e metais



Fonte: (BEBER, 2003)

A partir deste gráfico é possível observar a elevada capacidade resistiva das fibras em geral em comparação ao aço. Nota-se que as fibras de carbono, tanto do tipo de alta resistência (HS) como do tipo de elevado módulo de elasticidade (HM) apresentam resistência consideravelmente superior às demais fibras, característica de extrema importância para situações de reforço estrutural.

De modo geral, os valores das propriedades dos componentes dos sistemas FRP são fornecidos pelo fabricante do produto, sendo que em caso de ausência, o ACI 440-2017 recomenda valores relacionados na tabela 1.

Tabela 1- Propriedades de fibras de vidro, aramida, carbono e aço

Propriedade	Vidro (E)	Aramida (H)	Carbono de elevada resistência (HS)	Carbono de elevado módulo (HM)	Aço CA-50
Resistência à tração (MPa)	1869 - 2680	3440 - 4140	3790 - 4820	1720 - 3100	500 (escoamento) 550 (ruptura)
Módulo de elasticidade (GPa)	69 - 72	110 - 124	220 - 240	340 - 520	210
Deformação na ruptura (%)	4,5	1,6	1,4	0,5	0,2 (escoamento) 6 (ruptura)
Densidade (kg/m ³)	1200 - 2100	1200 - 1500	1500 - 1600		7850
Coeficiente de dilatação (x10 ⁻⁴ °C)	6 a 10 (longitudinal)	-6 a -2 (longitudinal)	-1 a 0 (longitudinal)		11,7
	19 a 23 (transversal)	60 - 80 (transversal)	22 a 50 (transversal)		

Fonte: Adaptada (BEBER, 2003)

3.4.3 Fadiga FRP

O comportamento do PRF à fadiga tem sido estudado extensivamente nos últimos anos (ACI 440.2R, 2017). De todos os tipos de compósitos para aplicações na área infraestrutura, o CFRP e o menos propenso à falha por fadigas. Porém, todos os compósitos de FRP apresentam, normalmente, uma resistência à fadiga superior à do aço. Enquanto o aço rompe subitamente, os compósitos sofrem uma degradação progressiva assinalada pela ruptura de algumas fibras, fissuração da matriz, delaminação e descolamento (MENEGHETTI, 2007).

Assim, a combinação destes mecanismos pode afetar prejudicialmente algumas das propriedades destes materiais, como, a resistência e a rigidez. Consequentemente muitas das pesquisas sobre dano cumulativo em materiais compósitos estão relacionadas principalmente com a investigação da resistência residual e a diminuição da rigidez durante o processo de fadiga (MENEGHETTI, 2007).

3.5 REFORÇO COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO (CFRP)

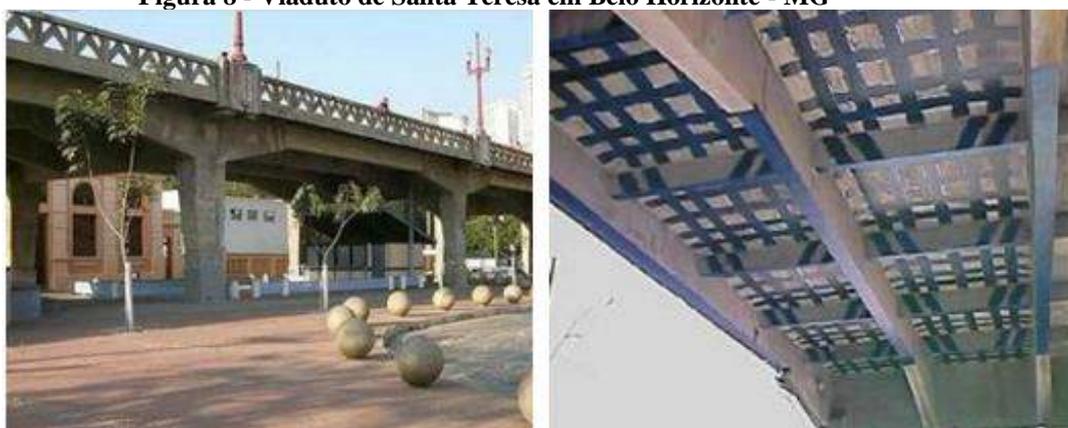
O uso do CFRP recebeu grande impulso a partir de sua utilização para recuperação de elementos danificados pelo terremoto de Kobe, no Japão, em 1995. Os compósitos foram usados na reabilitação de pilares em pontes e viadutos em função das excelentes características de durabilidade que o material demonstrou em testes de laboratório (MENEGHETTI, 2007).

De forma análoga, os sistemas compostos de reforço também ganhavam força nos Estados Unidos, onde a utilização de fibras para o reforço de estruturas de concreto era de

grande interesse desde os anos 1930. Porém, apenas nos anos 1980 iniciou-se o desenvolvimento de pesquisas sobre a aplicação de sistemas compostos no país (VIEIRA, 2014). Desde então, uso PRFC passou expandi no mundo inteiro, inclusive no Brasil.

Segundo Machado (2002), a primeira obra realizada no Brasil através do reforço com a técnica de PRFC foi o viaduto de Santa Teresa, localizado em Belo Horizonte – MG, como ilustra Figura 8.

Figura 8 - Viaduto de Santa Teresa em Belo Horizonte - MG



a) Vista lateral do viaduto

b) Reforço com PRFC

Fonte: Adaptada (ARQUEZ, 2010)

Obra realizada no ano de 1927. O viaduto tombado pelo Patrimônio Histórico e Cultural do Estado de Minas Gerais tem uma extensão de 397 m, e 1998 passou pelo reforço para atender às novas demandas de carga (classe 45 tf), mas não poderia ter suas dimensões alteradas (ARQUEZ, 2010).

Para atender a essa exigência foi utilizado o sistema de PRFC, que garantiu o aumento da capacidade de carga sem praticamente alterar suas dimensões e características estéticas originais, conforme ilustra a Figura 8 b.

O caso plausível segundo Pita (2011), referente ao reforço do viaduto Santo Amaro, que passa por cima da Avenida Bandeirantes em São Paulo – SP. O viaduto construído em 1969 em concreto protendido tem cerca de 280 m de extensão e 11 m de largura e estava precisando ser alteado em 1,1 m e alargado, para atender às novas exigências de demanda. A técnica escolhida pelo calculista responsável, foi o uso CFRP que reduzindo tempo de obra em comparado os outra técnica em seis meses. Permitindo aumenta a resistência sem que houvesse nenhuma alteração no gabarito (VIEIRA, 2014).

Desde então, muitas pesquisas e estudos com aplicações em campo vêm sendo desenvolvidos. Estes estudos têm sido amplamente documentados, por Sousa; Rippler, (1998),

Meier (1987), Ferrari (2002), Beber (2003), entre outros, que são exemplos de pesquisa que mostra o comportamento e aplicações desse compósito no âmbito engenharia estrutural. Dessa forma, a aplicação CFRP representa grande interesse por parte do mercado e do meio científico, visto que atende às demandas de eficiência da indústria da construção civil e permite a realização de pesquisas sobre o desenvolvimento de materiais e técnicas de reforço estrutural cada vez mais econômicos e seguros (PINTO, 2018).

Como foi visto anteriormente, a inviabilidade do uso de métodos tradicionais em algumas situações abriu portas para a pesquisa e busca de novos materiais que pudessem substituí-las.

Segundo Beber (2003) os principais motivos que leva ao uso técnica através do CFRP, são:

- As fibras conseguem manter elevada resistência e rigidez sob condições de altas temperaturas;
- São versáteis devido a suas várias características físicas e mecânicas;
- É imune a ação de alguns solventes, ácidos e bases;

De forma mais concreta e, de acordo com Sena-Cruz et al. (2011), a utilização de materiais compósitos CFRP no reforço estrutural apresentam as seguintes principais vantagens: aumento da resistência à flexão/cisalhamento, aumento do grau de confinamento, redução da deformação, permite um melhor controle da largura e distribuição de fendas, apresentam elevada razão resistência/peso, para além de ser um material com espessura reduzida, flexível, leve e de fácil aplicação, não suscetível a corrosão e com elevada capacidade de dissipação de energia.

Além de identificar a necessidade de reforço de uma estrutura e optar pelo material a ser utilizado, deve-se determinar qual a melhor técnica de aplicação do reforço a ser aplicada (PINTO, 2018). Dentre as diversas técnicas de reforço estrutural que surgiram com a utilização de polímero reforçado com fibra de carbono, podemos citar duas principais: o Externally Bonded Reinforcement (EBR) e a sua variação, o Near Surface Method (NSM).

3.5.1 Externally Bonded Reinforcement (EBR)

Essa técnica tem como princípio a colagem dos PRF, sendo mais comum a utilização de materiais na forma de mantas ou tecidos, que será colado externamente ao substrato dos elementos que se deseja reforçar: na face tracionada, no caso de reforço à flexão; nas faces

laterais e inferiores, no caso de reforço ao cisalhamento. Essa colagem é realizada com a utilização de uma resina específica, geralmente à base de epóxi (PINTO, 2018).

Aplicação da técnica deve se atentar aos seus requisitos, garantindo que a superfície apresente as condições de aderência adequadas para receber o reforço, sendo necessário lixar, texturizar, para garantir a rugosidade adequada na sua aplicação, como ilustra figura 9.

Figura 9- Abrindo pontos de aderência na superfície



Fonte: Adaptada (BEBER, 2003)

A técnica de colagem externa (EBR) apresenta como desvantagem o fato de o reforço estar fixado na superfície externa, estando dessa maneira vulnerável à sua degradação, principalmente, por causa das condições ambientais, como incêndios, temperaturas elevadas, radiação ultravioleta, umidade ou até mesmo a atos de vandalismo. A figura 10, mostra a técnica EBR, sendo aplicada em viga de concreto armado em um trabalho realizado por Beber (2003).

Figura 10- Aplicação do método EBR



Fonte: Adaptada (BEBER, 2003)

3.5.2 Near Surface Method (NSM)

Com o desenvolvimento de materiais mais modernos, como a fibra de carbono, e de resinas mais eficientes, a aplicação do método NSM ganhou maior impulso no meio científico

e passou a ser foco de muitas pesquisas, principalmente tratando de elementos de concreto armado reforçados à flexão e ao cisalhamento com PRF pelo método NSM, que consiste na instalação de barras ou lâminas em ranhuras cravadas na superfície do elemento reforçado. Esse material é fixado com a utilização de resina à base epóxi, a qual também é utilizada para preencher a ranhura após a instalação do reforço. A realização das ranhuras, devem ser realizadas com dimensões controladas e de forma extremamente cuidadosa, para evitar cortes nos estribos do elemento já existente. Figura 11, ilustra a aplicação da técnica de reforço por colagem de laminados em ranhuras (NSM).

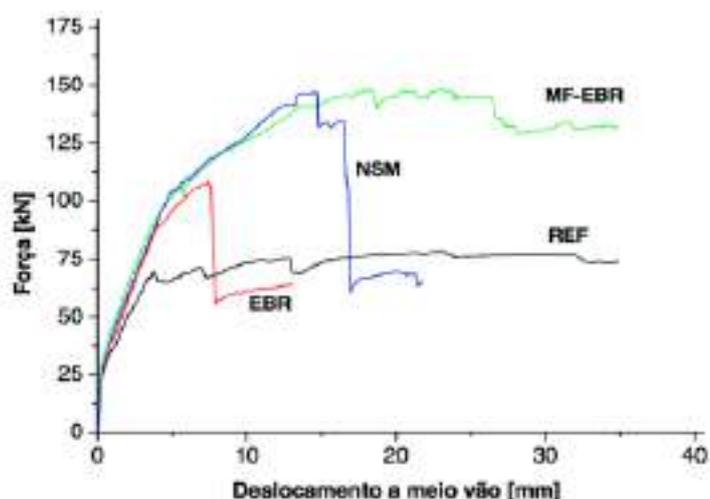
Figura 11- Aplicação do método NSM



Fonte: Adaptada (SILVA, 2016)

De acordo com Coelho (2011), foram realizados ensaios para comprovar a eficiência das técnicas de reforço com PRF, foi identificado uma grande vantagem na aplicação da técnica NSM, o gráfico realiza através de estudos mostrou que o NSM é mais eficiente que os demais métodos, como ilustra a Figura 12.

Figura 12- Comparativo das técnicas de reforço FRP



Fonte: (COELHO, 2011)

Neste gráfico comparativo nota-se a presença de quatro vigas, onde o espécime EBR refere-se à viga reforçada com o método Externally Bonded Reinforcement (EBR), o espécime NSM refere-se à viga reforçada com o método Near Surface Method (NSM), o espécime REF refere-se à viga de referência, sem nenhuma forma de reforço estrutural e o espécime MF-EBR refere-se à viga reforçada com o método Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement (MF-EBR).

O método MF-EBR consiste em colar e ancorar laminados multidirecionais de fibras de carbono na superfície do elemento de concreto armado, os quais são fixados com parafusos metálicos (parabolts), instalados na superfície do elemento reforçado. Como o sistema de ancoragem está distribuído ao longo do reforço de FRP, este método ajuda a desenvolver maiores tensões em toda a extensão do reforço de FRP, diminuindo a concentração de tensões e aumentando a resistência da ligação (COELHO, 2011).

Analisando o gráfico, é possível observar que para um mesmo deslocamento aplicado em vigas reforçadas pelas diferentes técnicas apresentados no gráfico acima, os elementos que utilizam a técnica NSM suportam uma força superior antes de atingirem a ruptura, comparada a técnica reforçada com EBR. Segundo Machado; Machado (2015), esse comportamento pode ser justificado pela maior eficiência construtiva da técnica NSM, uma vez que neste caso os esforços nas fibras são incorporados de forma mais efetiva ao concreto por meio da transferência de esforços, por intermédio da resina, para as superfícies das ranhuras criadas entre a superfície externa do concreto e os estribos existentes.

3.5.3 Mecanismos de ligação

O mecanismo de ligação do FRP em peças de concreto armado é um problema crítico que influencia negativamente a sua eficiência. O sistema FRP é obtido principalmente pela adesão química proporcionada pelo uso de um adesivo e a ruptura ocorre frequentemente na região de sua ligação. Entretanto a importância da realização de estudos ao nível da interface, pois o mecanismo de ruptura por destacamento do FRP (perda de adesão) é frágil, ocorrendo de forma repentina e sem qualquer aviso prévio (SOARES, 2017).

3.5.4 Modos de Ruptura

Ao aplicar determinada técnica de reforço estrutural e realizar análises sobre a sua eficiência e comportamento, deve-se compreender sobre os possíveis modos de ruptura

apresentado ao reforçar peças de concreto armado. A forma mais precisa de compreender estes mecanismos de ruptura é a realização de ensaios experimentais, que permitem avaliar de forma visual estes mecanismos e os parâmetros que influenciam na capacidade resistente de uma peça reforçada. Assim, alguns modos de ruptura ocorrem de maneira frágil e outros de maneira mais dúctil, sendo os mecanismos frágeis os mais indesejados e aqueles que devem ser inicialmente verificados no processo de dimensionamento do reforço (PINTO, 2018).

No entanto, para compreender o comportamento das peças reforçada com materiais polimérico e dimensioná-los de forma adequada, segura e efetiva, é fundamental conhecer os modos de ruptura proporcionado pelo sistema de reforço aplicado (PINTO, 2018). Dessa forma, diversos autores como Triantafillou (1998), Juvandes (1999), Sallaberry (2005), Yao e Teng (2007), Meneghetti (2007), Menor (2008), Costa (2011) apontam a necessidade de se estabelecer uma classificação representativa dos modos/falhas.

Segundo Fib Bulletin 14 (2001), os modos de ruptura apresentado em vigas de concreto armado reforçado à flexão por colagem externa com PRF podem ser divididos em dois grupos: Modo clássico onde a ação composta apresenta a ligação perfeita do compósito ao concreto se mantém até que o concreto atinja o esmagamento, e o modo prematuro onde a ação composta é perdida antes do modo de ruína clássico.

Modos ruína clássica serão descritos a seguir:

- i) A ruína através do escoamento do aço seguido da ruptura do reforço FRP ilustrado pela figura 13, ocorre com taxas de aço e de reforço relativamente baixas. Para que aconteça este tipo de ruptura, o reforço com PRF deve estar adequadamente ancorado (FIB BULLETION 14, 2001).



Fonte: Adaptada (COSTA, 2011)

- ii) Escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto, ilustrado pela figura 14. De acordo com o Fib Bulletin 14 (2001), esse tipo de ruína ocorre quando a capacidade resistente à flexão da viga é alcançada com o escoamento da armadura, seguido pelo esmagamento do concreto na zona comprimida.

Figura 14- Escoamento do aço seguido esmagamento do concreto



Fonte: (OBAIDAT, 2011)

- iii) Esmagamento do concreto ilustrado pela Figura 15. Segundo o Fib Bulletin 14 (2001), para altas taxas de armadura, a ruína das estruturas de concreto armado pode ser causada pelo esmagamento do concreto comprimido antes do escoamento da armadura. É um modo frágil e certamente indesejável.

Figura 15- Ruína por esmagamento do concreto



Fonte: (AHMED, 2011)

- iv) Ruína por cisalhamento ocorre quando a viga alcança sua capacidade limite do esforço cortante antes que o concreto crie falha por flexão, fenômeno provocado pelo aumento que o FRP proporciona no momento resistente da viga. De acordo com Gao et al. (2007), as fissuras de cisalhamento se estendem a partir das proximidades do apoio até o ponto de aplicação da carga, como mostra figura 16.

Figura 16- Ruína por cisalhamento



Fonte: (MENOR, 2008)

Modos/falhas prematuras são descritas a seguir:

- v) Descolamento do reforço FRP, ilustrado pela figura 17, é tipo de ruína prematura onde descolamento tem origem em uma fissura intermediária flexão-cisalhamento que induz a uma falha na interface concreto-reforço.

Figura 17- Ruína por deslocamento do reforço



Fonte: (SALLABERRY, 2005)

- vi) Ruptura do concreto na região do cobrimento como mostra a figura 18. Segundo Yao e Teng (2007) esse tipo de ruína ocorre quando uma fissura inclinada se inicia próximo a uma das extremidades do reforço e se estende até o nível da armadura de tração e rapidamente se propaga até o vão central.

Figura 18- Ruptura na região do cobrimento



Fonte Adaptada (YAO;TENG, 2007)

- vii) Descolamento na interface entre o adesivo-concreto apresentado pela figura 19. De acordo com Fib Bulletin 14, (2001) essa falha pode ocorrer quando a superfície de concreto não é convenientemente preparada durante o processo de aplicação do reforço porque a força de coesão da resina epóxi é menor que a força de aderência.

Figura 19- Ruína por descolamento adesivo-concreto



Fonte: (JUVANDES, 1999)

3.6 REFORÇO DE VIGA À FLEXÃO ATRAVÉS DO USO CFRP, DE ACORDO COM ACI 440.2R:2017

De acordo com a norma ACI 440.2R (2017) aplicação do sistema CFRP em estrutura de concreto armado, proporcionará um aumento de resistência ao esforço à flexão quando o

compósito estiver posicionado na face tracionada do elemento e orientadas ao longo de seu comprimento longitudinal. Levando em consideração os limites de ganho de resistência, os limites de ductilidade e a facilidade de manutenção, a ACI 440.2R:2017 orienta que é conveniente limitar os aumentos da resistência em 40% (SILVA, 2016).

É importante observar que, quando utilizado reforço com CFRP para aumentar a resistência à flexão de um elemento, o mesmo deve ser capaz de resistir às forças de cisalhamento associadas com o aumento inerente do carregamento. A chance de ruptura por cisalhamento da seção deve ser verificada por comparação entre as tensões de cálculo ao cisalhamento e a resistência ao cisalhamento existente. Caso as tensões atuantes sejam superiores à resistência, pode ser concebida uma resistência adicional ao cisalhamento através da utilização de laminados de PRFC orientados transversalmente ao eixo longitudinal da viga.

De acordo com a norma ACI 440.2R:2017, os reforços com sistemas compostos estruturados com fibras de carbono devem ser projetados de acordo com as recomendações de utilização e resistência da ACI 318:2014, utilizando-se os fatores de majoração e minoração dos carregamentos e das ações ali indicados, prevendo a ocorrência tanto do estado limite último (ELU) quanto do estado limite de serviço (ELS).

3.6.1 Dimensionamento de Vigas reforçada à Flexão com CFRP

O procedimento de cálculo para o reforço com CFRP que será apresentado a seguir está embasado nas prescrições normativas da ACI 440.2R:2017.

Para a verificação da peça à flexão, a resistência de cálculo deve ser maior que as solicitações ponderadas, ou seja, $\phi M_n \geq M_u$, onde a resistência à flexão nominal (M_n) multiplicada pelo fator de redução (ϕ) deve ser superior ao momento solicitante ponderado M_u , que corresponde ao momento calculado com as cargas multiplicadas pelos fatores de combinação exigidos pela ACI 318:2014.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (3.6.1)$$

Onde:

M_n = Momento fletor resistente de cálculo;

M_u = Momento solicitante ponderado.

A análise resistente de peça reforçada através do CFRP submetida aos esforços à flexão devem se baseado em arranjo interno das armaduras e nas propriedades dos materiais existentes do elemento a ser reforçado (SILVA, 2016).

3.6.1.1 Modos de falhas

Nas vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, a norma ACI 440.2R:2017 aponta alguns modos de ruptura devem ser investigados, como:

- Ruptura por esmagamento do concreto antes do escoamento da armadura;
- Ruptura por escoamento do aço tracionado seguido por ruptura do CFRP;
- Ruptura por escoamento do aço tracionado seguido por esmagamento do concreto;
- Delaminação do concreto de cobrimento por cisalhamento na região reforçada com CFRP;
- Descolamento do PRFC do substrato de concreto.

Considerando que o esmagamento do concreto ocorre quando a deformação na fibra mais comprimida atinge o valor de 3,5‰ (NBR 6118) ou 3‰ (ACI-440.2R:2017). A ruptura do CFRP só ocorre quando a deformação última de tração do CFRP (ε_{fu}) é atingida antes do esmagamento do concreto.

A delaminação do concreto de cobrimento ou descolamento do CFRP pode ocorrer se a força no CFRP não puder ser sustentada pelo substrato. Esse comportamento é geralmente referido como descolamento, independentemente de onde o plano de falha se propaga dentro da região CFRP-adesivo-substrato. Para evitar este modo de ruptura (descolagem induzida pela abertura de fissuras), a deformação efetiva no CFRP deve ser limitada à ε_{fd} , conforme a seguinte expressão:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'c}{n E_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} \quad (3.6.2)$$

Onde:

$f'c$ = Resistência característica compressão do concreto;

t_f = Espessura de cada camada do reforço CFRP;

n = Número de camadas do reforço CFRP;

E_f = Módulo de elasticidade do CFRP;

ε_{fu} = Deformação de ruptura máxima utilizável no CFRP.

Onde o valor de ε_{fu} é definido por meio da multiplicação de um fator de redução ambiental para diferentes condições de exposição, ilustrado pela tabela 2, pelo valor de deformação de ruptura da fibra de CFRP informado pelo fabricante ($\varepsilon_{fu,fab}$), ou seja:

$$\varepsilon_{fu} = CE \varepsilon_{fu,fab} \quad (3.6.3)$$

Tabela 2- Fator de redução ambiental para diferentes condições de exposição

CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO	TIPO DE FIBRA	FATOR DE REDUÇÃO AMBIENTAL (CE)
EXPOSIÇÃO EM AMBIENTE INTERNO	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
EXPOSIÇÃO EM AMBIENTE EXTERNO	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
AMBIENTE AGRESSIVO (INDÚSTRIAS QUÍMICAS)	Carbono	0,85
	Vidro	0,5
	Aramida	0,7

Fonte: Adaptada (ACI 440.2R:2017)

3.6.1.2 Fator de redução da resistência do CFRP à flexão (ϕ)

O uso de CFRP colado externamente reduz a ductilidade original do elemento. Em alguns casos, essa redução pode ser desprezível. Em outros, onde é significativa a redução da ductilidade, o nível de deformação do aço no estado limite último deve ser verificado para que seja mantido um grau suficiente de ductilidade no elemento. Para elementos de concreto armado com armadura passiva, a ductilidade adequada é alcançada quando a deformação do aço no ponto de esmagamento do concreto ou do fracasso do CFRP, incluindo a delaminação ou descolagem, for de pelo menos 0,005. Ou seja, é indicado que a deformação fique acima de 5‰ para se evitar a ruptura frágil (SILVA, 2016).

Portanto, ACI-440.2R:2017 recomenda utilizar o fator de redução da resistência, dado pela equação (3.6.4).

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \epsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\epsilon_t - \epsilon_{sy})}{0,005 - \epsilon_{sy}} & \text{para } \epsilon_{sy} \leq \epsilon_t \leq 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \epsilon_t \leq \epsilon_{sy} \end{cases} \quad (3.6.4)$$

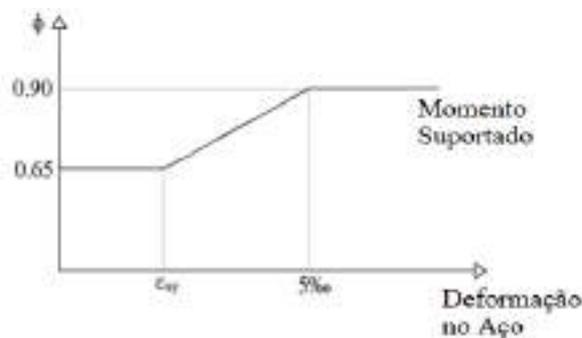
Onde:

ϵ_t = Deformação unitária líquida de tração no aço;

ϵ_{sy} = Deformação de escoamento da armadura .

A equação (3.6.4), define um fator de redução de 0,90 para seções dúcteis e 0,65 para seções frágeis (onde o aço não escoou) e fornece uma transição linear para o fator de redução entre estes dois extremos, conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20- Fator de redução em função da ductilidade da peça



Fonte: Adaptada (ACI 440.2R:2017)

3.6.1.3 Verificação do estado limite último

A resistência à flexão característica das peças de concreto armado reforçadas com CFRP, pode ser determinada com base na compatibilidade de tensões, no equilíbrio das forças internas e no conhecimento do modo de falha da estrutura.

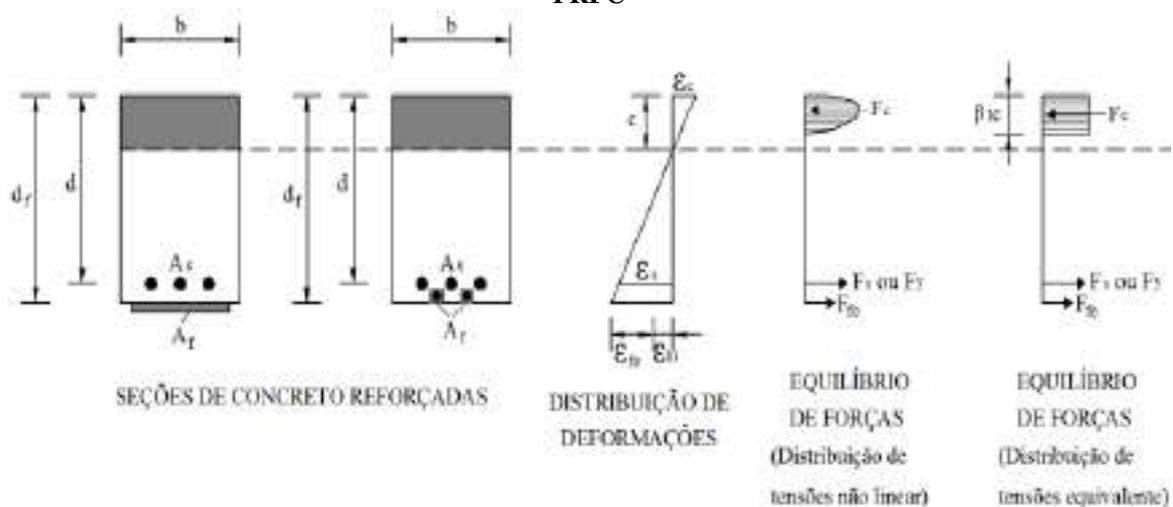
Algumas premissas devem ser pré-estabelecidas, como:

- As deformações no aço e no concreto são diretamente proporcionais à sua distância da linha neutra;
- Uma seção plana antes do carregamento permanece plana após o carregamento;
- A resistência à tração do concreto é desprezada;

- A deformação por cisalhamento no interior da camada adesiva é desconsiderada, visto que, a camada adesiva é muito fina com pequenas variações em sua espessura;
- A deformação máxima de compressão utilizável no concreto, é de 0,003mm/mm;
- O PRFC se comporta de forma elástica-linear até a ruptura.

O método de cálculo utilizado para chegar à resistência última deve satisfazer a compatibilidade de deformações e o equilíbrio das forças internas e, ainda, controlando-se o modo ruptura. A figura 21 mostra a distribuição de deformações e de tensões utilizada pelo ACI 440.2R:2017 para o cálculo do momento resistente (M_n) na verificação ao estado limite último.

Figura 21- Distribuição de tensões e equilíbrio de forças internas de uma seção retangular reforçada com PRFC



Fonte: Adaptada (ACI 440.2R:2017)

É muito importante o conhecimento do nível de deformação no reforço de CFRP deve ser determinado no estado limite último. Como o CFRP é um material elástico-linear até a ruptura, o seu nível de deformação ditará o nível de tensão desenvolvido (SILVA, 2016).

A deformação no reforço CFRP, (ϵ_{fe}) também pode ser limitada pelo ponto de esmagamento do concreto, ou pelo ponto em que o CFRP se descola do substrato. O nível de deformação do PRFC no estado limite último pode ser determinado a partir da Equação (3.6.5).

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad (3.6.5)$$

Onde:

d_f = Profundidade efetiva do reforço CFRP;

ε_{cu} = Máxima deformação admitida no concreto comprimido;

ε_{bi} = Deformação existente no substrato, no momento de aplicação do reforço.

c = Distância da fibra comprimida mais distante a linha neutra.

A ACI 440.2R:2017 também limita o nível de tensão que pode ser atingido nos reforços com FRP, antes da ruptura por flexão da seção. Esse nível efetivo de tensão pode ser obtido da correlação com o nível de deformação do CFRP, assumida a condição de comportamento perfeitamente elástico:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (3.6.6)$$

Com base no nível de deformação no reforço de PRFC, o nível de deformação no aço passivo pode ser determinado fazendo-se uma compatibilidade de deformações.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (3.6.7)$$

Onde:

d = Altura útil da armadura.

Desta forma, a tensão no aço é determinada a partir do nível de sua deformação por intermédio do seu diagrama de tensão-deformação.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (3.6.8)$$

Onde:

f_y = Tensão de escoamento do aço;

E_s = Módulo de elasticidade do aço.

Determinados os níveis de deformação e tensão no PRFC e nas armaduras, pode ser determinada a profundidade da linha neutra assumida a partir do equilíbrio das forças internas, sendo:

$$c = \left(\frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 \beta_1 f'_c b} \right) \quad (3.6.9)$$

Onde os termos α_1 e β_1 são parâmetros que definem um bloco retangular equivalente de tensões no concreto para a distribuição não-linear de tensão. A ACI 440.2R:2017, item 10.2.10, recomenda a adoção do valor de $\alpha_1=0,85$ e o valor de β_1 correspondem àqueles definidos na seção 22.2.2.4.3 da ACI 318:2014 e apresentados na tabela 3 no presente trabalho.

Tabela 3 - Valores de β_1 em função f'_c

f'_c , MPa	β_1
$17 \leq f'_c \leq 28$	0.85
$28 < f'_c < 55$	$0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7}$
$f'_c \geq 55$	0.65

Fonte: Adaptada (ACI 318:2014, p.349)

A posição da linha neutra é encontrada satisfazendo-se as equações (3.6.5), (3.6.7) e (3.6.9), de forma a estabelecer o equilíbrio das forças internas e compatibilização das tensões. O cálculo da profundidade da linha neutra é procedido iterativamente até que haja convergência, ou seja, quando a somatória das forças internas de tração e compressão resultem em zero.

A resistência à flexão nominal da seção com reforço externo de CFRP é calculada a partir da Equação (3.6.10). Um coeficiente minoração adicional no CFRP (ψ_f), é aplicado como contribuição à resistência a flexão do reforço de PRFC. O valor recomendado para é $\psi_f=0,85$ segundo a ACI 440.2R:2017.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (3.6.10)$$

Onde:

A_s = Área da armadura de tração da seção;

f_s = Tensão de tração no aço;

d = Altura útil da seção;

d_f = Altura total da seção;

β_1 = Fator de transformação do diagrama de tensões;

c = Posição da linha neutra;

ψ_f = Coeficiente de minoração da resistência do FRP, 0,85 para esforço flexão;

A_f = Área de FRP;

A_{fe} = Tensão de tração efetiva.

3.6.1.4 Verificação do estado limite serviço

Na verificação do estado limite serviço em peças de concreto armado reforçados com CFRP, a tensão no aço e no concreto devem ser limitadas, de forma a evitar deformações plásticas sob cargas de serviço, especialmente em elementos sujeitos a cargas cíclicas.

Para se evitar deformações plásticas das armaduras dos elementos de concreto reforçados externamente com os compósitos de CFRP deve-se limitar a tensão no aço a 80% da tensão de escoamento, e a tensão no concreto em 45% da resistência à compressão característica do concreto, conforme as equações a seguir.

$$f_{s,s} \leq 0,80f_y \quad (3.6.11)$$

$$f_{c,s} \leq 0,45f_c' \quad (3.6.12)$$

$$f_{s,s} = \frac{[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f (d_f - \frac{kd}{3})] (d - k.d) E_s}{[A_s E_s (d - \frac{kd}{3}) (d - kd)] + [A_f E_f (d_f - \frac{kd}{3}) (d_f - kd)]} \quad (3.6.13)$$

Onde:

M_s = Momento fletor para as cargas não majoradas.

A profundidade da linha neutra em serviço, (kd), pode ser calculado similarmente ao cálculo convencional de concreto armado através do primeiro momento das áreas da seção transformada. Para calcular o valor (k) usa a seguinte equação (3.6.14).

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{d_f}{d}\right)\right) - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)} \quad (3.6.14)$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{A_{cg}} \quad (3.6.15)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{A_{cg}} \quad (3.6.16)$$

Onde:

A_{cg} = Área bruta da seção transversal da peça;

3.6.1.5 Verificação da ruptura por fluência ou fadiga

Segundo ACI 440.2R:2017, para evitar a ruptura do PRFC por fluência sob tensões constantes ou por fadiga sob tensões cíclicas, deve ser verificado o nível de tensão no reforço PRFC sob condições de serviço ($f_{f,s}$). Tais tensões podem ser calculadas através de uma análise elástica, uma vez que nessas condições os elementos certamente trabalharão dentro da gama de respostas elásticas do elemento. Níveis de tensões cíclicas são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Níveis seguros de tensões cíclicas

Tipo de Tensão	Tipo de Fibra		
	Fibra de Vidro	Fibra de Aramida	Fibra de Carbono
Ruptura por fluência: tensão limite, $F_{f,s}$	0,20 $f_{f,u}$	0,30 $f_{f,u}$	0,55 $f_{f,u}$

Fonte: (Adaptada, ACI 440.2R:2017)

O nível de tensões (Mpa) no reforço de CFRP pode ser calculado através da equação a seguinte:

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{d_f - kd}{d - kd} \right) - E_f \quad (3.6.17)$$

Portanto, a tensão (Mpa) devido às cargas permanentes deve ser limitada de acordo com a equação (2.6.17).

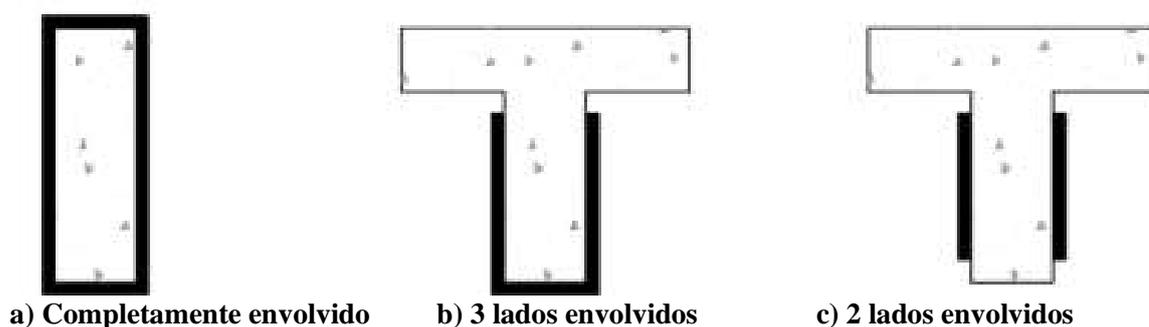
$$f_{f,s} \leq 0,55 f_{f,u} \quad (3.6.18)$$

3.7 REFORÇO DE VIGA AO CISALHAMENTO COM CFRP DE ACORDO COM ACI 440.2R:2017

De acordo com a ACI 440.2R:2017, os sistemas de CFRP têm sido utilizados para aumentar a resistência ao cisalhamento em estruturas de concreto armado, através do envolvimento total ou parcial desta peça estrutural. A utilização desse compósito, proporcionar uma resistência adicional ao cisalhamento quando as fibras são orientadas transversalmente ao eixo do elemento ou perpendicularmente onde se encontra as possíveis fissuras do elemento estrutural (SILVA, 2016).

O envolvimento do PRFC, consiste basicamente em três tipos, onde é utilizado para aumentar a resistência ao cisalhamento em um elemento estrutural como ilustra figura 22. O envolvimento completo da estrutura com o sistema de PRFC em torno da seção é a forma mais eficiente, onde o acesso aos quatro lados geralmente está disponível. No caso de vigas, onde na grande maioria dos casos existe um feixe laje integrante em uma das faces, desta forma, a resistência ao cortante passa a ser aumentada através do envolvimento do sistema de CFRP em torno de três lados ou através da colagem apenas nos dois lados opostos do elemento (ACI 440.2R:2017).

Figura 22- Esquema de reforço ao cisalhamento através uso CFRP



Fonte: Adaptada (ACI 440.2R, 2017)

A maioria dos pesquisadores que estudaram o comportamento de vigas reforçadas com CFRP idealizou a resistência do reforço aos esforços cisalhantes de maneira análoga aos estribos, assumindo que a sua contribuição para a capacidade de resistência ao cisalhamento provém do trabalho das fibras em resistir às tensões, sob deformação aproximadamente constante.

3.7.1 Dimensionamento de Viga Reforçada ao Cisalhamento com CFRP

De acordo ACI 318:2014, item 9.5.1.1, a resistência nominal de uma peça de concreto armado reforçada ao cisalhamento com um sistema de CFRP, deve ser superior ao esforço solicitado e a resistência do reforço deve ser calculada multiplicando a resistência nominal por um fator de redução. De acordo com o item 21.2.2 desta norma, o fator de redução ϕ deve ser definido para considerar a variação das forças e das dimensões dos materiais, considerar a imprecisão das equações de projeto, garantir a ductilidade da peça e refletir o seu grau de

importância na estrutura. Para peças solicitadas ao cisalhamento ou torção, o valor de deve ser igual a 0,75.

$$\phi V_n \geq V_u \quad (3.6.19)$$

Onde:

V_n = Força cortante resistente característico;

V_u =Força cortante última solicitante de cálculo.

A determinação da capacidade nominal resistente (V_n) de uma peça de concreto armado reforçada com sistema CFRP é calculada pela soma de três parcelas resistente distintas, conforme a equação (3.6.20).

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (3.6.20)$$

Onde:

V_c = Resistência do concreto ao corte;

V_s = Resistência da armadura transversal;

V_f =Resistência ao cortante do CFRP.

V_c e V_s são calculados através das seguintes equações de acordo norma ACI 318:2014.

$$V_c = 0,17\sqrt{f'_c} b_w d \quad (3.6.21)$$

$$V_s = \frac{A_s f_{yt} d}{s} \quad (3.6.22)$$

Os valores assumidos pelo fator de redução (ψ_f), para a contribuição do compósito de CFRP, são ilustrados na tabela 5. Um fator de redução da resistência do CFRP $\psi_f = 0,85$ é recomendado quando o reforço aplicado em três lados (forma de “U”) ou apenas nas duas laterais da peça. Os dados experimentais são insuficientes para realizar uma análise de confiabilidade para seções totalmente envolvidas; no entanto, é recomendado pela ACI 440.2R:2017 a utilização de um fator de redução ψ_f de 0,95. O fator ψ_f é calibrado com base nas propriedades do material (SILVA, 2016).

Tabela 5- Fatores adicionais de redução para o reforço com fibra de carbono PRFC

Fator de redução adicional o reforço CFRP	
Elemento completamente envolvidos	$\psi_f = 0,95$
Elemento em duas ou três faces do elemento	$\psi_f = 0,85$

Fonte: Adaptada (ACI 440.2R:2017)

3.7.1.1 Contribuição do CFRP na resistência à força cortante

A contribuição do sistema CFRP para resistência ao cisalhamento dá um elemento está baseado na orientação das fibras e em um suposto padrão de fissuração. A resistência ao cisalhamento fornecida pelo reforço CFRP pode ser determinada por meio do cálculo da força resultante da tensão de tração no CFRP através da fissura assumida (SILVA, 2016).

A contribuição ao cisalhamento dada pelo CFRP é definida pela Equação (3.6.23).

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{S_f} \quad (3.6.23)$$

Onde:

V_f = Resistência ao cisalhamento fornecida pelo CFRP;

α = Ângulo entre as tiras inclinadas e o eixo longitudinal da viga;

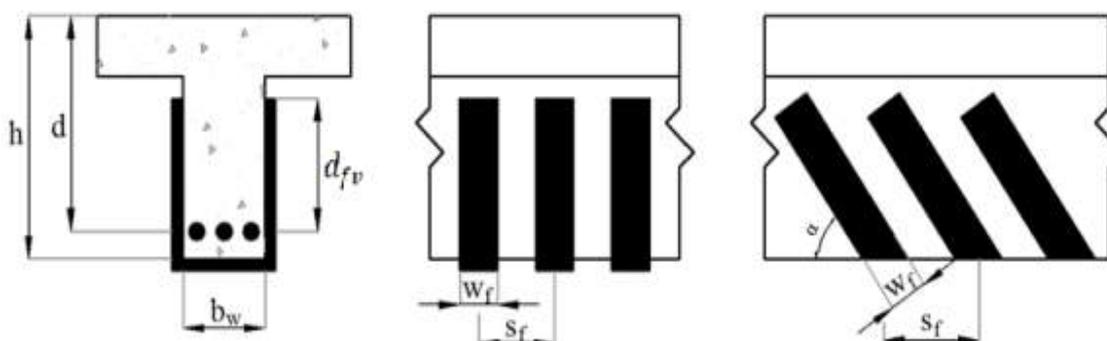
f_{fe} = Tensão efetiva no CFRP;

S_f = Espaçamento entre tiras medido paralelamente ao eixo da viga;

d_{fv} = Altura útil do CFRP (distância entre as armaduras e o final das tiras).

Figura 23 ilustra esquema de posicionamento para dimensionamento da resistência do reforço através do CFRP.

Figura 23- Esquema de posicionamento para dimensionamento ao cisalhamento com CFRP



Fonte: Adaptada (ACI 440.2R:2017)

A área da sessão transversal do CFRP é dada pela seguinte expressão:

$$A_{fv} = 2n t_f w_f \quad (3.6.24)$$

Onde:

n = Número de camadas do compósito CFRP;

t_f = Espessura do compósito;

w_f = Largura do compósito CFRP.

A tensão nominal de tração no reforço CFRP (f_{fe}) é diretamente proporcional ao nível de deformação (ε_{fe}) que pode ser desenvolvido no reforço CFRP, conforme é dado pela equação (3.6.25).

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (3.6.25)$$

3.7.1.2 Deformação efetiva do CFRP

Portanto, deve-se observar que a deformação máxima efetiva que pode ser desenvolvida pelo sistema CFRP na resistência nominal é definida pelo de ruptura do sistema e do elemento de concreto armado reforçado (SILVA, 2016).

A deformação efetiva é a máxima deformação que reforço pode atingir até as cargas últimas.

Para vigas de concreto armado completamente envolvidos por CFRP, a ocorrência de perda de coesão dos agregados do concreto tem sido observada para níveis de deformação menores que a deformação última. A fim de evitar este tipo de insuficiência, a deformação máxima utilizada para projeto deve ser limitada a 0,4%. Conforme equação (3.6.26).

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{fu} \quad (3.6.26)$$

Para sistema onde não cobrem a seção inteira (colagem em dois ou três lados), uma delaminação do concreto pode ocorrer devido à perda de engrenamento dos agregados da seção. Por esta razão, a deformação efetiva é calculada usando um coeficiente de redução de ligação (k_v) aplicável ao cisalhamento.

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (3.6.27)$$

O coeficiente de redução de ligação (k_v) é determinado em função da resistência do concreto, do sistema de envolvimento utilizado e da rigidez do laminado. O coeficiente de redução de ligação pode ser computado a partir da equação (3.6.28).

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (3.6.28)$$

O comprimento da ligação ativa/efetivo (L_e) é o comprimento ao longo do qual a maior parte das tensões de aderência são mantidas. Esse comprimento é calculado pela seguinte equação (3.6.29).

$$L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \quad (3.6.29)$$

Os coeficientes k_1 e k_2 levam em consideração a resistência do concreto e do sistema de envolvimento utilizado, e são expressos pela seguinte equação (3.6.30) e (3.6.31).

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.6.30)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{para envolvimento em três lados} \\ \frac{d_{fv} - 2 L_e}{d_{fv}} & \text{para CFRP colado em apenas dois lados} \end{cases} \quad (3.6.31)$$

Segundo a ACI 440.2R:2017, a metodologia para a determinação de (k_v) foi validada para regiões de alto cisalhamento e momento baixo, em elemento como vigas simplesmente apoiadas e uniformemente carregadas. Embora a metodologia não tenha sido confirmada para o ganho de resistência de cortante em áreas sujeitas a alta flexão combinada com tensões de cisalhamento, ou em regiões onde a zona inferior é principalmente comprimida (momento negativo), supõe-se que o valor de seja suficientemente conservador para tais casos.

3.7.1.3 Limites dos reforços

A resistência ao cisalhamento total fornecida pelo reforço CFRP deve ser tomada como a soma da contribuição do reforço do compósito ao cisalhamento com a contribuição de reforço

fornecida pelas armaduras (estribos), e deve seguir os seguintes limites, de acordo com equação (3.6.32).

$$V_s + V_f \leq 0,66\sqrt{f'_c} b_w d \quad (3.6.32)$$

Onde:

b_w = Largura da base da viga

3.7.1.4 Espaçamento das lâminas de reforço ao cisalhamento

O espaçamento máximo das lâminas deve seguir as orientações normativas existentes, portanto, o espaçamento é definido como a distância de centro a centro de duas lâminas. A ACI 440.2R:2017 em seu item 11.1 apontam que esse espaçamento não deve exceder a:

$$S_f \leq \frac{d}{4} + w_f \quad (3.6.33)$$

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após uma breve descrição dos métodos de reforço utilizado em vigas de concreto armado, juntamente com uma abordagem sobre processo de aplicação e suas características e propriedades, podemos resumir e entender qual o método mais se adequa para cada tipo de manifestação encontrada.

O presente trabalho teve como princípio geral realizar uma revisão bibliográfica acerca do desempenho e eficiência do uso de compósitos reforçados com fibra de carbono em vigas de concreto armado, submetida aos esforços à flexão e ao cisalhamento. Buscando de forma sucinta sua origem como este material vem se destacando de forma positiva no mercado de reforço estrutural.

Conclui-se que através do presente trabalho foi possível observar em números pontos que leva a busca por uso CFRP (Polímeros Reforçado com Fibras de Carbono) por apresentar uma gama de vantagem na sua constituição, uso CFRP é bastante recomendado em casos de ocorrência de fissuras originadas por causas mecânicas, devido principalmente, sua elevada resistência, e por não apresenta nenhum tipo de alteração na geometria do elemento reforçado e por não sofrer corrosão em ambientes agressivos. Entretanto, não é recomendada sua utilização em ambientes com presença de sulfatos ou de chuva ácida; nem em situações a deficiências provenientes de fenômenos físicos, como assentamento plástico ou segregação do concreto.

Durante a realização deste trabalho foi possível observar diversos estudos com investigações relevantes do comportamento das vigas reforçadas com variações de propriedades e condições de testes experimentais. Dentre elas, observou-se um fator que limitou a atuação uso CFRP em quase todos os estudos. O descolamento dos compósitos de fibra de carbono evita que o reforço atinja níveis de tensão maiores e interrompe a atuação destes polímeros de maneira precoce. Com isso, na maioria das ocorrências de desprendimento do reforço, o causador não é uma colagem defeituosa do material junto à superfície da viga, mas o arrancamento da cobertura de concreto que não suporta o acúmulo de tensões que o reforço traz para aqueles pontos de fragilidade.

Outro aspecto vivenciado neste trabalho, até como objetivo específico, foram análise, modos e falhas, utilizados para prever cargas de ruptura à flexão e ao cisalhamento, tornando-se um dos pontos presentes no processo de dimensionamento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R:2017**. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318:2014**. Building code requirements for structural concrete. ACI Committee 318. Detroit, 2014.

ARAÚJO, C.R.R. **Reforço de flexão e cisalhamento com materiais compósitos de fibras de carbono em vigas de concreto armado**.2005. 98f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

ARQUEZ, A.P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**.2010. 242p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo 2010.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. Tese (Doutorado em Estruturas) - Programas de Pós-graduação em engenharia civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

BROSENS, K. **Anchorage of externally bonded steel plates and CFRP laminates for the strengthening of concrete elements**. 2001. Tese (Faculty of Applied Science Katholieke) – Universiteit Leuven. Heverlee, 2001.

CRUZ, J. R. L. **Influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM**. 2016. 147p. Dissertação (mestrado). Universidade do Minho - Escola de Engenharia, Rio Janeiro 2016.

COELHO, M.; SILVA, L.; SENA-CRUZ, J.M.; BARROS, J. **Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob ações monotônicas e de fadiga**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Portugal, 2011.

DRUN, A.G, FAVERSANI, L. C. B. **Reforço de vigas de concreto armado sujeitas a flexão com compósitos de fibra de carbono: estudo de caso - Bloco S da UTFPR-PB**. 2016. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta e fibras de carbono: mecanismos e sistemas de ancoragem – XXX**. Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, 2002.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. 328f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GAMINO, A.L, BITTENCOURT, T.N, SOUSA, J.L.A.O. **Estruturas de concreto reforçada com PRFC. Parte I: análise dos modelos de flexão**. IBRACON, V,2, No. 4, pp, 326-355,2009.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **FIB 2001: Externally Bonded FRP Reinforcement for Concrete Structures**, Lausanne, 2001(Bulletin 14).

JUVANDES, L.F.P; MARQUES, A. T; FIGUEREIRAS, J. A. **Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão**. 112p. Faculdade de engenharia da universidade do porto, 1996. Relatório Técnico.

JUVANDES, L.F.P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP**. 400f. Tese de Doutorado, Faculdade de engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1999.

JUNIOR, Luiz Alberto Spagnolo. **Estudo Experimental do Reforço à Força Cortante de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono**. 290p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.

MACHADO, A. de P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. 282 p.1 Ed., São Paulo, 2002.

MACHADO, A. P. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: Better, 2011.

MENON, Nara villanova. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono**. 332f. Dissertação (Defesa Doutorado) -Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MENEGHETTI, L.C. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MELO, R.H. **Reforço à Flexão de Vigas com Compósitos de Fibras de Vidro e de Carbono Inseridos no Concreto de Cobrimento**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2017.

NASCIMENTO, A. R. **Capacidade de carga de vigas de concreto armado reforçadas com perfis de aço laminado**. 191f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, 2017.

PRADO, D. M. **Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com laminados de CFRP por meio de análise estática e modal**. 2016. 189 p.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

PIVATTO, A. B. **Reforço estrutural à flexão para viga biapoiada de concreto armado por chapas metálicas e compósito reforçado com fibras de carbono**. 126p (Monografia). Universidade Federal Paraná, Curitiba 2014.

PINTO, L.G. **Análise da Resistência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com Fibra de Carbono pelo Método Near Surface Mounted**. 137p, Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

PITA, Marina. Viaduto recebe reforço de fibra de carbono para elevação de TB. **Revista Infraestrutura Urbana**, São Paulo, n. 16, 2011

PALIGA, C. M.; REAL, M. V.; CAMPOS FILHO, A. **Análise numérica de vigas de concreto armado reforçadas por compósitos formados por fibras de alta resistência e argamassa de cimento**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 6, n. 2, 2013.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia de estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 200.

SANTOS, M. R. G. **Deterioração das estruturas de concreto armado – Estudo de caso**. 2012. Monografia (Especialização) – Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SOARES, S. R. R. **Estruturas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP: caracterização da aderência e do comportamento em flexão**. Dissertação de Mestrado-Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2017.

SILVA, A. S. C. **Análise de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com fibras de carbono: abordagem teórica e computacional**. 219 f. Dissertação (Defesa de Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

SOUZA, V. C, RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1a ed. São Paulo: Pini, 1998.

SCHWARTZ, M. M. **Composite materials handbook**. New York: McGraw-Hill, 1984.

SHEHATA, I. A. E. M., TEIXEIRA JR., S. V. **Reparo de Consolos Durtos Danificados. In: jornadas sul-americanas de engenharia estrutural**. 28f, 1997, São Carlos, São Paulo, 1997

TAKEUTI, A. R. **Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

TRIANAFILLOU, T. C. **Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded PRF composites**. ACI Structural Journal. v. 95, n. 2, p. 107-115, Mar- Apr 1998.

VIEIRA, M.M. **Estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono**. 2014. 244f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

YAO. J.; TENG. J. G. Plate end debonding in FRP-plated RC beams – I: Experiments. **Engineering Structures**, 2007, n. 29, p. 2457-2471