

ASSOCIAÇÃO VITORIENSE DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E CULTURA - AVEC
CENTRO UNIVERSITÁRIO FACOL - UNIFACOL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL - BACHARELADO

DÉBORA PATRÍCIA DA SILVA

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE
FIBRA DE CARBONO: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SEGUNDO O ACI
440.2R-17**

VITÓRIA DE SANTO ANTÃO - PE
2021

DÉBORA PATRÍCIA DA SILVA

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE
FIBRA DE CARBONO: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SEGUNDO O ACI
440.2R-17**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário FACOL - UNIFACOL, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas de Concreto Armado

Orientador(a): Esp. Edmilson Raimundo de Oliveira Junior

VITÓRIA DE SANTO ANTÃO - PE
2021

SILVA, Débora Patrícia da.

Reforço de Vigas de Concreto Armado Com
Compósitos de Fibra De Carbono: Dimensionamento À
Flexão Segundo O ACI 440.2r-17. / Débora Patrícia da
Silva. Vitória de Santo Antão: CENTRO
UNIVERSITÁRIO FACOL - UNIFACOL, 2021
*65f.

Bibliografia

Monografia realizada no Curso de Engenharia
civil orientada pelo Prof. Edmilson Junior.

1. Concreto armado. 2. Reforço Estrutural. 3.
Fibra de Carbono. 4. CFRP I Título.

CDD 744.424



ASSOCIAÇÃO VITORIENSE DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E CULTURA - AVEC
CENTRO UNIVERSITÁRIO FACOL - UNIFACOL
COORDENAÇÃO DE TCC DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ATA DE DEFESA

Nome do Acadêmico: Débora Patrícia da Silva

Título do Trabalho de Conclusão de Curso: Reforço de Vigas de Concreto Armado
Com Compósitos de Fibra De Carbono: Dimensionamento À Flexão Segundo O ACI 440.2r-17

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário FACOL - UNIFACOL,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas de
Concreto Armado

Orientador: Edmilson Raimundo de
Oliveira Junior

A Banca Examinadora composta pelos Professores abaixo, sob a Presidência do primeiro, submeteu o candidato à análise da Monografia em nível de Graduação e a julgou nos seguintes termos:

Professor: _____

Julgamento – Nota: _____ Assinatura: _____

Professor: _____

Julgamento – Nota: _____ Assinatura: _____

Professor: _____

Julgamento – Nota: _____ Assinatura: _____

Nota Final: _____. Situação do Acadêmico: _____. Data: ___/___/___

MENÇÃO GERAL:

Coordenador de TCC do Curso de Engenharia Civil: Anna Regina Tschá

Dedico esta pesquisa aos meus pais, pilares da minha formação como ser humano.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe que sempre me deu apoio e incentivo em momentos difíceis, de desânimo e cansaço. Que sempre cuidou tão bem de mim priorizando sempre meu bem estar, e foi a grande provedora da minha formação, a ela sou inteiramente grata.

Ao meu pai que sempre me passou ensinamentos e sempre me incentivou a nunca desistir. A ele que muitas vezes abdicou de seu descanso para me acompanhar até o transporte da faculdade para garantir a minha segurança.

Ao meu professor orientador Edmilson por toda paciência e dedicação durante todo processo de elaboração do presente trabalho. Expresso minha profunda gratidão por todos os ensinamentos e pela sincera amizade que foi criada durante o processo.

A todos meus amigos, em especial à Laryssa que embarcou junto comigo nessa jornada. A qual compartilho bons momentos desde o ensino médio e também estive comigo diante de todas as dificuldades.

Ao meu irmão Felipe por estar ao meu lado e por me fazer ter confiança nas minhas decisões.

A todos os professores do curso que me forneceram todas as bases necessárias para a realização deste trabalho. Por me proporcionar o conhecimento não somente racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

Em especial ao Dr Sérgio (*in memoriam*) o qual tive o prazer de ser sua aluna e aprender muito com seu incrível profissionalismo e humanismo. A ele expresso minha profunda admiração e gratidão.

Aos meus colegas do curso pelas trocas de ideias e ajuda mútua. Em especial a Felipe que me deu grandes oportunidades de aprendizado e crescimento profissional.

À professora Anna que mesmo em momentos difíceis que enfrentamos com esse novo modelo de ensino, nos incentivou a vencer todas as dificuldades e concluir o trabalho.

Às empresas que me ofertaram estágio contribuindo para adquirir conhecimento prático.

Também quero agradecer ao Centro Universitário UNIFACOL e à coordenação do curso que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

Por fim agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a elaboração dessa monografia.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

O estudo apresenta uma pesquisa bibliográfica das técnicas de reforço estrutural. São descritas as principais causas do aparecimento de manifestações patológicas alinhadas a necessidade de realizar reabilitação e reforços nas estruturas de concreto armado. São descritas algumas das técnicas de reforço de peças de concreto armado com foco no reforço com compósito de fibras de carbono. Junto a apresentação das técnicas também são descritas as características da fibra de carbono. É apresentado os procedimentos de cálculo necessários para o dimensionamento do reforço com a utilização da fibra de carbono. São também apresentados exemplos de dimensionamento de reforço estrutural em vigas de concreto armado. Assim como o processo de criação de um programa de cálculo com a utilização do Excel, para calcular o dimensionamento de reforço a flexão em vigas de concreto armado com a utilização de sistemas reforçados com fibra de carbono. É apresentada uma aplicação que demonstra a eficácia do programa. É realizada uma discussão sobre os resultados da pesquisa e também acerca dos resultados da aplicação do programa de cálculo criado. Por fim é apresentada uma conclusão sobre os resultados da pesquisa.

Palavras-chave: Concreto Armado. Reforço estrutural. Fibra de Carbono. CFRP.

ABSTRACT

The study presents a bibliographical research on structural reinforcement techniques. The main causes of the appearance of pathological manifestations in line with the need to carry out rehabilitation and reinforcement of reinforced concrete structures are described. Some of the reinforcement techniques for reinforced concrete parts are described, focusing on the reinforcement with carbon fiber composite. Along with the presentation of the techniques, the characteristics of carbon fiber are also described. The calculation procedures necessary for the reinforcement dimensioning with the use of carbon fiber are presented. Examples of structural reinforcement design in reinforced concrete beams are also presented. As well as the process of creating a calculation program using Excel, to calculate the bending reinforcement design in reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced systems. An application that demonstrates the effectiveness of the program is presented. A discussion is held about the research results and also about the results of the application of the created calculation program. Finally, a conclusion about the research results is presented.

Key-words: Reinforced Concrete. Structural reinforcement. Carbon fiber. CFRP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Equilíbrio (Deformação x Forças Resultantes) na seção.	25
FIGURA 2 – Deformação inicial de peso próprio.	30
FIGURA 3 – Domínios de dimensionamento do concreto armado.	34
FIGURA 4 – Determinação do momento resistente.	35
FIGURA 5 – Metodologia.	40
FIGURA 6 – Viga simplesmente apoiada para reforço.	42
FIGURA 7 – Determinação do valor do braço de alavanca z	43
FIGURA 8 – Determinação valor da deformação ϵ_{bi}	43
FIGURA 9 – Verificação da necessidade de reforço.	44
FIGURA 10 – Equilíbrio do sistema de força.	44
FIGURA 11 – Resolução de equações.	45
FIGURA 12 – Verificação da deformação máxima permitida no CFRP.	45
FIGURA 13 – Verificação da deformação máxima permitida nos materiais – parte 01.	46
FIGURA 14 – Verificação da deformação máxima permitida nos materiais – parte 02.	46
FIGURA 15 – Equilíbrio das forças resultantes.	47
FIGURA 16 – Nova verificação da deformação máxima permitida no CFRP.	48
FIGURA 17 – Nova verificação da deformação máxima permitida nos materiais – parte 01.	48
FIGURA 18 – Nova verificação da deformação máxima permitida nos materiais – parte 02.	49
FIGURA 19 – Nova verificação do equilíbrio das forças resultantes – primeira parte.	49
FIGURA 20 – Nova verificação do equilíbrio das forças resultantes – segunda parte.	50
FIGURA 21 – Verificação da contribuição do aço para a flexão.	50
FIGURA 22 – Determinação do valor de k	51
FIGURA 23 – Determinação tensão na armadura de aço – primeira parte.	51
FIGURA 24 – Determinação e verificação da tensão na armadura de aço – segunda parte.	52
FIGURA 25 – Determinação e verificação da tensão no CFRP.	52
FIGURA 26 – Apresentação inicial do programa de cálculo de reforço à flexão com CFRP.	54
FIGURA 27 – Detalhe da seção transversal da viga.	54
FIGURA 28 – Detalhe da seção transversal da viga.	55
FIGURA 29 – Detalhe da seção transversal da viga.	55
FIGURA 30 – Verificação quanto a necessidade de reforço.	56
FIGURA 31 – Exemplo dos dados de cálculo preenchidos.	56
FIGURA 32 – Exemplo das verificações para o equilíbrio do sistema de forças.	57

FIGURA 33 – Exemplo do equilíbrio do sistema de forças – linha neutra convergindo.....	57
FIGURA 34 – Exemplo do equilíbrio do sistema de forças – linha neutra não convergindo.	58
FIGURA 35 – Exemplo de em que a contribuição do aço atende aos requisitos.....	58
FIGURA 36 – Exemplo de em que a verificação das tensões atende aos requisitos.	58
FIGURA 37 – Dados do exemplo de cálculo – primeira tentativa.....	59
FIGURA 38 – Confirmação quanto a necessidade de reforço – primeira tentativa.....	59
FIGURA 39 – Dados de cálculo – primeira tentativa.	60
FIGURA 40 – Verificações para o equilíbrio das forças – primeira tentativa.	60
FIGURA 41 – Equilíbrio das forças – primeira tentativa.....	61
FIGURA 42 – Dados do exemplo de cálculo – segunda tentativa.	61
FIGURA 43 – Dados do exemplo de cálculo – segunda tentativa.	62
FIGURA 44 – Dados de cálculo – segunda tentativa.	62
FIGURA 45 – verificações para o equilíbrio das forças – segunda tentativa.....	63
FIGURA 46 – Equilíbrio das forças – segunda tentativa.	63
FIGURA 47 – Contribuição do aço para flexão – segunda tentativa.	63
FIGURA 48 – Verificação das tensões – segunda tentativa.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
FIB	Fédération Internationale du Béton
FRP	Fiber Reinforced Polymer
NBR	Norma Técnica Brasileira
NSM	Near Surface Mounted
PAN	Poliacrilonitrila

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Problema de pesquisa.....	14
1.2 Hipóteses.....	15
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.4 Justificativa	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Reabilitação de estruturas de concreto.....	17
2.2 Principais métodos de reforço de estruturas de concreto	17
2.2.1 Aumento da seção transversal.....	17
2.2.2 Adição de chapas metálicas	18
2.2.3 Reforço com compósitos de fibras de carbono.....	18
2.3 Compósitos de Fibra de Carbono	19
2.3.1 Propriedades das fibras de carbono	19
2.3.2 Aplicação de sistemas compostos com fibra de carbono.....	20
2.3.3 Dimensionamento do reforço estrutural à flexão com o compósito CFC.....	22
2.4 Propriedades características dos materiais.....	23
2.5 Modos de ruptura de um elemento de concreto	24
2.6 Dimensionamento do reforço CFRP	27
2.7 Nível de deformação do reforço com CFRP.....	28
2.8 Nível de tensão no reforço.....	30
2.9 Fator de redução da resistência dos sistemas CFRP	30
2.10 Sequência para cálculo de reforço a flexão com CFRP segundo o ACI 440.2R-17..	30
2.11 Determinação do momento resistente do reforço	32
2.12 Resistencia final da peça reforçada.....	35
2.13 Tensões no Aço submetido a cargas de serviço.....	35
2.14 Tensões no CFRP submetido a cargas de serviços	36
2.15 Observações para a linha neutra.....	37
3 METODOLOGIA	38
3.1 Considerações para Programa para o Cálculo de Reforço à Flexão com CFRP	39
3.2 Exemplo de cálculo	39
3.2.1 Análise do exemplo de cálculo proposto por Machado e Machado	39
4 RESULTADOS	51

4.1 Programa para o cálculo de reforço à flexão com CFRP	51
4.1.1 Entrada de dados	51
4.1.2 Tabela para obter o coeficiente de redução ambiental	53
4.1.3 Verificação quanto a necessidade de reforço	54
4.1.4 Dados de cálculo	54
4.1.5 Verificações para o equilíbrio do sistema de forças	55
4.1.6 Equilíbrio do sistema de forças	55
4.1.7 Contribuição do aço para flexão	56
4.1.8 Verificação das tensões de serviço na armadura de aço e no CFRP.....	56
4.2 Aplicação	57
5 DISCUSSÃO.....	63
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Historicamente a humanidade é marcada por estar sempre em busca de materiais que supram suas necessidades, majoritariamente de abrigo e proteção. Com isso, deu-se início a busca por materiais com maior longevidade e resistência. No início, os materiais encontrados que atendiam suas necessidades foram a argila e a pedra, contudo a utilização da pedra não se tornava algo prático devido ao seu elevado peso e a argila era, então, um material pouco resistente. Esses fatores levaram o homem a buscar materiais com melhores qualidades construtivas e os obrigaram a estudar o aprimoramento das técnicas construtivas existentes.

A descoberta da pozolana, conhecida também como cimento romano, foi um agente de evolução das técnicas de arquitetura da época do Império Romano. A grande descoberta deu origem ao aglomerante que misturado a areia e pedra, permitiu a criação de um material com alta resistência, o concreto, tornando possível o surgimento de novas formas e tipos de estrutura. A introdução de armaduras de aço ao concreto obtendo como produto o concreto armado só aconteceu no final do século XIX. A descoberta do concreto é atribuída a Lambot, um agricultor francês, que em 1849 construiu a primeira estrutura de concreto armado, um barco. Ele testou o barco em sua propriedade e registrou sua patente somente em 1855, mesmo ano em que a estrutura foi apresentada na Feira Mundial de Paris. Contudo, foi observado posteriormente que na verdade a estrutura era composta de argamassa armada.

O projeto de Lambot não teve grandes repercussões, mas chamou a atenção de Joseph Monier, um jardineiro francês, que vislumbrou a possibilidade de substituir os vasos de plantas ornamentais que até então produzia em madeira ou cerâmica, produtos que apodreciam ou quebravam com muita facilidade, pelo concreto armado. Com o sucesso obtido, iniciou a produção de vários artefatos, registrando várias patentes de concreto armado com ferro.

O século XX foi marcado pela consolidação do concreto armado, tornando-se um dos materiais mais importante e largamente usado na engenharia estrutural. O avanço da tecnologia do concreto e de suas técnicas construtivas junto a criação de *Softwares*, capazes de prever com precisão o comportamento do concreto e do aço, permitiram a plena exploração de suas propriedades.

De acordo com Beber (1998, p. 3) “embora otimizadas do ponto de vista estrutural e econômico, as novas estruturas de concreto são mais sensíveis a qualquer defeito dos materiais, da execução ou do cálculo, podendo gerar situações de risco.”

Contudo, mesmo que as estruturas de concreto apresentem um período de vida útil consideravelmente longo, sua durabilidade pode ser influenciada por fatores como falhas construtivas, falhas de projeto ou até má utilização, que podem levar ao aparecimento de manifestações patológicas. Com isso, devemos considerar essas falhas, a utilização e a ação do tempo sobre as estruturas, com o intuito de garantir a segurança de quem a utiliza. Sendo importante então, realizar inspeções periódicas a fim de prevenir e identificar manifestações patológicas, possibilitando a realização de intervenções assertivas e evitando uma possível ruína da estrutura. Diante desses motivos, as técnicas de recuperação de estruturas têm evoluído no sentido de mitigar a possibilidade de limitar o uso da estrutura ou até mesmo a necessidade de demolição.

O aprimoramento das técnicas e dos materiais utilizados no processo de recuperação das estruturas, traz como alternativa os materiais compósitos de *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), em português Polímero Reforçado com Fibra de Carbono, que apresenta aspectos positivos para a sua utilização em comparação com outros materiais. Dentre suas principais vantagens podem ser citadas: baixo peso próprio, imunidade a corrosão, facilidade de aplicação, versatilidade geométrica, excelentes propriedades mecânicas, entre outras.

1.1 Problema de pesquisa

O uso de polímeros reforçados com fibra do inglês *Fiber Reinforced Polymer* (FRP), tem sido cada vez mais estudado e usado como alternativa aos métodos tradicionais. Pode ser citado como um potencial material, pertencente a essa classe, o compósito de fibra de carbono (CFC). Contudo, não existe norma nacional que determine a metodologia de cálculo para o reforço com CFRP, fazendo-se necessária a utilização de normas internacionais como a norma americana do American Concrete Institute (ACI), a ACI-440.2R-17. O cálculo apresentado na norma já citada apresenta um procedimento iterativo que necessita de valores de partida que são arbitrados e convergem para um resultado final por tentativas.

Desta forma, desenvolver uma rotina de cálculo utilizando um software de fácil acesso, como o Microsoft Excel, poderia trazer resultados satisfatórios no processo de dimensionamento do reforço com CFRP.

1.2 Hipóteses

Parte-se da hipótese que a aplicação de fibra de carbono pode contribuir para o reforço de estruturas de concreto armado, pois seus componentes apresentam uma alta rigidez e uma elevada resistência à tração. Admitindo então que um programa que agilize parte do processo de dimensionamento do reforço com a utilização desse material traga benefícios e resultados satisfatórios.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O trabalho teve como objetivo geral desenvolver um programa de cálculo para o dimensionamento do reforço de vigas de concreto com o uso sistemas CFRP que facilite e agilize o processo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Apresentar as propriedades físicas e mecânicas do compósito de fibra de carbono;
- Pesquisar o método de cálculo para o reforço com sistema CFRP;
- Apresentar o modelo de dimensionamento proposto pela norma ACI-440.2R-17;
- Elaborar um programa para facilitar o processo do cálculo do reforço com sistema CFRP.

1.4 Justificativa

São diversos os motivos pelos quais as estruturas de concreto armado necessitam de recuperação ou reforços ao longo das suas vidas. Dentre esses motivos apresentam alguns casos: utilização da estrutura diferente da prevista no projeto, acarretando acréscimo de esforços que podem exigir reforços na estrutura; deformação excessiva da estrutura e surgimento de fissuras; vida útil de projeto alcançada; ou até mesmo por anomalias, falhas construtivas e de concepção, resultando em um baixo desempenho tendo então a sua capacidade de resistência reduzida, exigindo correções.

Os reforços das estruturas de concreto armado vem sendo cada vez mais estudados e aprimorados com a finalidade de apresentar métodos de reforços sem que haja a necessidade de demolir.

Dos métodos de reforços que vêm sendo usados, podem ser citados: aumento da seção transversal adicionando aço e concreto; uso da protensão externa; aplicação de chapas de aço na superfície das peças de concreto armado, etc. Nos últimos anos, os polímeros reforçados com fibra tem surgido como uma solução atraente quando comparada com outros materiais e métodos tradicionais de reforço, como os citados anteriormente. Destacando os polímeros reforçados com fibra de carbono que apresentam diversas vantagens como a leveza, facilidade de manuseio transporte e aplicação, elevada rigidez e alta resistência à tração, bom comportamento a fadiga.

No Brasil, as pesquisas e utilização dos compósitos de fibra de carbono são bastante recentes, não havendo nenhuma norma nacional que regulamente o uso desses materiais, além de existir uma carência bibliográfica que abordem o assunto.

A justificativa deste trabalho se dá pelo crescimento da necessidade de reforços estruturais e pelo potencial uso dos compósitos de fibra de carbono como uma boa alternativa, tornando necessário o desenvolvimento de estudos que demonstrem o comportamento físico e mecânico desse material executando a função de reforço estrutural. Sendo também, necessário desenvolver um método que busque facilitar e agilizar o procedimento para o dimensionamento do reforço de vigas de concreto com o uso sistemas CFRP.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Reabilitação de estruturas de concreto

O *Fédération Internationale du Béton* (FIB) citado por Beber (2013, p.7), define reabilitação como restabelecer a funcionalidade de uma estrutura ao nível original ou mais alto, tanto do ponto de vista da durabilidade quanto de resistência.

A terapia a ser utilizada no elemento estrutural é escolhida com a análise de vários fatores. Normalmente, quando há necessidade de reabilitar um ou mais elementos estruturais devem ser seguidas algumas etapas.

De acordo com Souza e Ripper (1998, p.79) a primeira etapa consiste no levantamento de dados que deve ser realizado por um profissional especialista e experiente na área de Patologia das Estruturas. Nessa etapa são coletadas todas as informações a respeito da estrutura, como: agentes agressores, detalhamento das manifestações patológicas existentes, identificação dos erros quanto a concepção da estrutura, análise dos projetos originais e dos projetos de modificações e ampliações (caso existam), realização de ensaios para a verificação do estado de conservação da estrutura, etc.

A segunda etapa trata-se da análise dos dados coletados, para que sejam identificados o comportamento estrutural e as causas das manifestações patológicas.

Na última etapa, são considerados os fatores econômicos, técnicos, de segurança e conforto, para a determinação da terapia a ser utilizada nos elementos danificados. Em casos onde haja algum fator que impeça a reabilitação da estrutura, o profissional responsável pelo levantamento pode indicar a demolição da estrutura.

2.2 Principais métodos de reforço de estruturas de concreto

2.2.1 Aumento da seção transversal

É uma técnica largamente usada no Brasil, e mesmo se tratando de uma metodologia mais antiga é utilizada até os dias atuais devido ao seu baixo custo dos materiais e tradição de uso.

Segundo Souza e Ripper (1998, p.218), tipicamente o reforço é caracterizado pelo aumento da altura da seção transversal de vigas, por meio de acréscimo de concreto na face superior, aumentando então, o braço de alavanca do momento resistente, e conseqüentemente a capacidade portante das vigas.

Mesmo sendo muito utilizado, o método possui diversas desvantagens como o aumento do peso próprio da estrutura, o alto risco de corrosão das armaduras, e a deterioração da camada de concreto do reforço.

2.2.2 Adição de chapas metálicas

A técnica consiste em fixar, na superfície externa das peças de concreto, chapas metálicas por meio de adesivo epóxi.

Segundo Souza e Ripper (1998, p.148) trata-se de uma técnica com grande eficácia quando objetiva-se aumentar a capacidade resistente e tem como característica a execução rápida, sendo uma boa alternativa para situações emergenciais ou quando os elementos a serem reforçados não podem sofrer mudanças em sua geometria.

A superfície de concreto do elemento que receberá o reforço tem grande importância para a transferência das tensões concreto-aço e como consequência, para o funcionamento correto do reforço, esta deve ser uniformemente rugosa e áspera para que se tenha boa aderência química entre as partes (SOUZA e RIPPER, 1998, p.149).

2.2.3 Reforço com compósitos de fibras de carbono

Segundo Araújo (2020, p.5) podemos definir fibra de carbono como uma fibra sintética composta por finos filamentos tubulares de 5 a 10 μm (micrometros) derivados, usualmente, do polímero Poliacrilonitrila.

A tecnologia para reforço de estruturas de concreto com compósitos de fibras de carbono conheceu alguns ajustes importantes e ganhou particular desenvolvimento após a ocorrência do sismo de Kobe, ocorrido no Japão em 17 de janeiro de 1995 (SOUZA e RIPPER, 1998, p152). Esta tecnologia trata-se de um grande passo evolutivo da história da indústria da Construção Civil, em sua busca constante por novas tecnologias mais simples, resistentes e duráveis, para a aplicação de reabilitação de estruturas de concreto (SOUZA e RIPPER, 1998, p. 152).

2.3 Compósitos de Fibra de Carbono

2.3.1 Propriedades das fibras de carbono

De acordo com Machado e Machado (2015, p. 4) as fibras de carbono são resultado do tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras tais como o poliácridonitrila (PAN) ou com base no alcatrão derivado do petróleo em um ambiente inerte e, também, através de fibras de rayon. Seu processo de produção trata-se da oxidação dessas fibras precursoras seguida do processamento a elevadas temperaturas. O PAN (poliacridonitrila) e precursores líquidos cristalinos de alcatrão quando carbonizados a temperaturas superiores a 800°C resultam na produção de fibras de carbono com elevado módulo de elasticidade, pois o mesmo tende a aumentar com o tratamento térmico em temperaturas situadas entre 1000°C e 3000°C.

Normalmente, os sistemas de compostos estruturados que fazem uso das fibras de carbono como elemento resistente apresentam as seguintes características, segundo Machado (2010?, p.2):

Extraordinária resistência mecânica; extraordinária rigidez; bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas; elevada resistência a ataques químicos diversos; não são afetados pela corrosão por se tratar de um produto inerte; estabilidade térmica e reológica; extrema leveza, devido ao baixo peso específico do sistema (da ordem de 1,6g/cm³ a 1,9g/cm³, cerca de 5 vezes menor do que o do aço estrutural) chega-se ao ponto de não se considerar o seu peso próprio nos reforços.

Os materiais compósitos com fibras de carbono são estruturados com uma matriz polimérica e um elemento estrutural. Segundo Machado e Machado (2015, p. 49), a matriz polimérica tem a função de manter as fibras que as estruturam coesas, propiciando a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois elementos estruturais, concreto e fibra de carbono, enquanto o elemento estrutural (fibras de carbono), estão dispostas unidirecionalmente dentro das matrizes absorvendo as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes.

A fibra de carbono deve ter uma ruptura frágil, e a matriz polimérica uma ruptura dúctil, pois há a necessidade de esta ter um alongamento de ruptura muito maior do que o alongamento que ocorre na fibra de carbono. Assim, garante-se que no sistema composto, a matriz continue a possuir capacidade de carga mesmo após a fibra ter entrado em colapso ficando descartado a possibilidade do sistema entrar em colapso pela ruptura frágil da matriz. (MACHADO; MACHADO, 2015, p. 49).

As fibras de carbono não se aderem as resinas com muita facilidade, em particular as fibras que possuem maiores módulos de elasticidade. Devido a isso foram desenvolvidos para determinados materiais utilizados nas matrizes resinosas, tratamentos superficiais que aumentam o número de grupos químicos ativos, e que eventualmente também aumentam a rugosidade da superfície da fibra. As fibras de carbono são frequentemente revestidas por um tratamento superficial epoxídico que previne a abrasão da fibra, facilita seu manuseio e proporciona uma interface compatível com a matriz resinosa.

2.3.2 Aplicação de sistemas compostos com fibra de carbono

Segundo Machado e Machado (2015, p. 5) no momento existem dois métodos de aplicação dos sistemas compostos utilizados para o reforço das estruturas. Os sistemas aderidos externamente às superfícies dos elementos de concreto e os sistemas aderidos ao concreto dentro de ranhuras abertas no cobrimento da peça de concreto.

Em um elemento submetido a um esforço de tração, admite-se que o reforço CFRP (polímero reforçado com fibra de carbono), com comportamento elástico linear na região da curva (tensão/deformação) considerada, seja incorporado ao concreto por meio de resinas adesivas de alta resistência.

Na aplicação do reforço por meio de elementos CFRP inseridos em ranhuras, procedimento denominado NSM (*Near Surface Mounted*) assume-se que os esforços sejam incorporados ao concreto por meio da transferência de forças, via adesivo, para as superfícies das ranhuras criadas no cobrimento da peça.

Contudo, antecedendo o processo de aplicação dos compósitos, a superfície que receberá o reforço necessita passar por uma preparação, podendo até necessitar de alguns reparos para melhorar sua capacidade de suporte e tornarem as superfícies saldáveis para o recebimento dos esforços transmitidos pelo sistema CFRP.

Podem ser consideradas intervenções necessárias para a aplicação dos sistemas de reforços: a reparação do substrato e reparação superficial.

Na reparação do substrato, podem ser necessários os reparos devido a corrosão das armaduras e injeção de fissuras, para fissuras acima de 0,2mm.

A preparação das superfícies dependerá da necessidade do tipo de instalação, que são dois, a colagem crítica e o contato crítico. As aplicações que exigem uma colagem crítica são as dos reforços à flexão ou ao corte de vigas, lajes, colunas ou paredes, que tem a necessidade de uma colagem eficiente entre o elemento de CFRP e o concreto. Nas aplicações que necessitam de um contato crítico, tais como o confinamento de colunas, exigem apenas um contato próximo entre o sistema CFRP e o concreto. As aplicações de contato crítico necessitam da colagem somente nas extremidades dos elementos do sistema, contudo para facilitar a aplicação a colagem é feita na totalidade da superfície de contato.

Na execução da colagem crítica o concreto ou as superfícies a serem reforçadas, deveram ter uma recente exposição, seja conseguida por lixamento ou jateamento abrasivo, e não devem apresentar vazios aparentes ou identificados através do *tap-test* (batidas de chocos). Se as fibras tiverem que envolver as quinas de seções quadradas ou retangulares as mesmas deverão ser arredondadas com um raio mínimo de 1,5 cm para evitar a concentração de tensões nas quinas e evitar que fiquem espaços vazios na dobra, entre a peça e o CFRP.

Os vazios superficiais deverão ser fechados com massa regularizadora e as marcas de formas ou rugosidades deverão ser desbastadas antes da instalação do sistema. Toda contaminação superficial como pintura, sujeira, poeira, etc. que possam interferir na eficiência da colagem deverá ser removida. Após todos os procedimentos preliminares a colagem, as lâminas de fibras de carbono são cortadas conforme projeto, aplica-se então, uma demão da resina de colagem e aplica a lâmina já cortada de forma imediata, eliminando as bolhas e os desvios. Em seguida, deve ser aplicado uma segunda demão de resina. O processo poderá ser

repetido a depender do número de camadas determinada no projeto. Por fim, faz-se o acabamento estético necessário.

No caso do contato crítico, nas aplicações que envolvam confinamento das peças de concreto armado, a preparação das superfícies deverá fundamentalmente ser direcionada no sentido de que seja estabelecido um contato íntimo e contínuo entre as superfícies envolvidas. Essas superfícies não podem apresentar concavidades ou convexidades que impeçam o carregamento correto dos sistemas. Todas irregularidades expressivas deverão ser corrigidas através do preenchimento com material de reparo compatível com as características mecânicas do concreto existente ou através de sua remoção para os casos das juntas de formas. Após a etapa de recuperação a aplicação se repete assim como na colagem crítica.

A aplicação dos reforços para os sistemas embutidos na superfície, NSM, são instalados em ranhuras cortadas na superfície da peça de concreto. As armaduras de aço existentes não devem ser danificadas nesse processo.

De maneira idêntica aos procedimentos anteriores, a sonoridade do concreto deverá ser testada antes da instalação do sistema CFRP nas ranhuras. As faces internas das ranhuras deverão ser limpas a fim de garantir uma perfeita adesão ao concreto. Após instalados as barras ou laminados dentro da ranhura a mesma deverá ser preenchida com adequada massa epoxídica.

2.3.3 Dimensionamento do reforço estrutural à flexão com o compósito CFC

Em casos de reforços à flexão de estruturas de concreto armado fazendo uso de um sistema composto e estruturado com fibras de carbono CFRP, ele é preferencialmente aderido as faces superior e/ou inferior das peças. Ou seja, o sistema CFRP é um sistema de reforço externo.

Alguns conceitos e considerações devem ser estabelecidos para o cálculo da resistência à flexão de uma estrutura de concreto reforçado com fibras de carbono, tais como destaca Machado e Machado (2015, p.124):

- Estudos e cálculos deverão ser baseados nas dimensões da seção existente, na quantidade e distribuição das armaduras de aço da mesma, bem como nas propriedades e características mecânicas dos materiais utilizados na confecção do elemento a ser reforçado.
- As seções planas deverão permanecer planas após a ocorrência dos carregamentos as deformações deverão ser proporcionalmente lineares à sua distância à linha neutra. Obedecendo aos critérios de Bernoulli.
- A tração do concreto deverá ser desprezada nos cálculos.
- Quando dimensionado segundo critérios da ABNT (Associação brasileira de Normas Técnicas), a deformação do concreto não deverá ultrapassar 3,5 ‰ e 3,0‰ quando dimensionado segundo critérios do ACI (*American Concrete Institute*).
- A aderência entre o sistema composto CFRP e o substrato de concreto deverá ser perfeita.
- A deformação será considerada linear até a ruptura no sistema composto CFRP

2.4 Propriedades características dos materiais

Segundo Machado e Machado (2015, p. 125) o dimensionamento a flexão deverá levar em consideração as seguintes recomendações de projeto:

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (2.2)$$

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (2.3)$$

Onde:

f_{fu} tensão de tração máxima de projeto da fibra de carbono.

f_{fu}^* tensão de tração da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante).

ε_{fu} deformação máxima de projeto da fibra de carbono.

ε_{fu}^* deformação máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante).

C_E coeficiente de redução ambiental.

O coeficiente de redução ambiental C_E obtido no quadro 01 seguinte:

QUADRO 1 - Coeficiente de redução ambiental C_E

Coeficiente de redução ambiental C_E		
Condição de exposição	Tipo da Fibra	Coeficiente de Redução Ambiental C_E
Exposição ao interior	Carbono	0.95
	Vidro	0.75
	Aramida	0.85
Exposição ao exterior (pontes, cais e garagens desprotegidas)	Carbono	0.85
	Vidro	0.75
	Aramida	0.65
Ambientes agressivos	Carbono	0.85
	Vidro	0.5
	Aramida	0.7

Fonte: adaptado de MACHADO; MACHADO (2015, p.125)

2.5 Modos de ruptura de um elemento de concreto

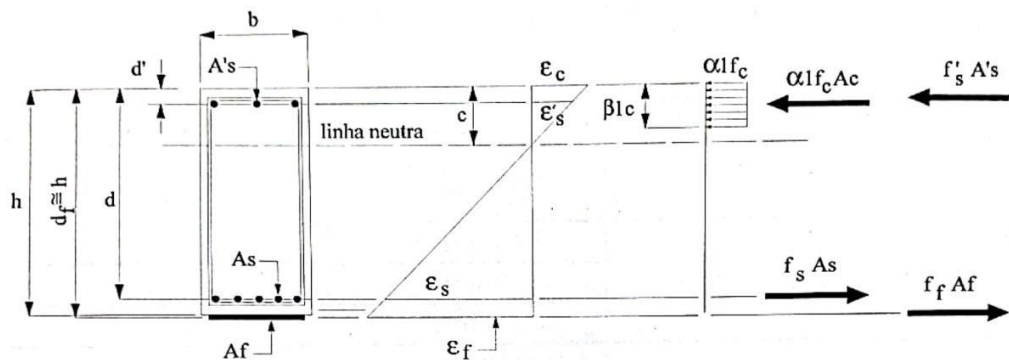
Segundo Machado e Machado (2015 p. 126) A ruptura de um elemento de concreto armado reforçado com CFRP pode ocorrer em quatro possibilidades distintas:

- 1 – ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto.
- 2 – ruptura por escoamento do aço antes na ruptura do sistema CFRP.
- 3 – ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura por escoamento do aço.
- 4 – ruptura do sistema CFRP antes da ruptura por escoamento do aço.

Os modelos de ruptura 1 e 2 caracterizam um comportamento dúctil da estrutura, o que é desejável. Já os modelos de ruptura 3 e 4 caracterizam um comportamento frágil da estrutura, o que é menos desejável.

Na Figura 1, pode ser visualizado o equilíbrio, deformação x forças resultantes na seção.

FIGURA 1 – Equilíbrio (Deformação x Forças Resultantes) na seção.



Fonte: MACHADO (2015, p.126)

O valor de β_1 é fornecido pela seguinte expressão seguinte:

$$\beta_1 = 1,05 - 0,005 \frac{f'_c}{7} \quad (2.4)$$

Onde,

β_1 = razão de profundidade do bloco retangular de tensões de compressão em relação à profundidade da linha neutra.

f'_c = resistência à compressão do concreto.

Quando a ruptura for controlada pelo esmagamento do concreto o bloco de tensões pode ser utilizado sem modificações com profundidade $0,85.c$ para concretos com resistências de até 27MPa. Acima desse valor o valor de β_1 deve ser diminuído com uma taxa constantes de 0,05

Para cada 7 MPa de acréscimo de resistência, contudo nunca deve ser tomado um valor inferior a 0,65, ou seja:

$$\beta_1 = 0,85 \text{ para } 17\text{MPa} < f'_c < 28\text{MPa}.$$

$f'_c > 28\text{MPa}$ o valor de β_1 deve ser diminuído em 0,05 para cada 7 Mpa de acréscimo sobre a resistência de 28MPa.

$$\beta_1 \geq 0,65.$$

Se o controle da ruptura for determinado pela ruptura do CFRP ou pela delaminação do cobrimento do concreto, o bloco de tensões de compressão fornece resultado mais exatos.

O bloco de tensões de compressão pode ser calculado de forma aproximada através da relação parabólica entre a tensão e a deformação do concreto por meio das expressões seguintes:

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon'_c - 2 \varepsilon_c}$$

(2.5)

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon'^2_c}$$

(2.6)

$$\varepsilon'_c = 1,71 \cdot \frac{f'_c}{E_c}$$

(2.7)

ε'_c máxima deformação do concreto não confinado, podendo ser considerado com um valor aproximado de 0,002.

E_c módulo de elasticidade do concreto.

Outros tipos de ruína podem acontecer em acréscimo aos listados, como uma falha prematura localizada na interface do concreto do substrato com o sistema composto. Essa falha pode ser evitada com um detalhamento apropriado do sistema utilizado.

Independentemente de onde estiver a seção analisada, a ruptura controlada pelo deslocamento do composto deve governar os procedimentos. Sendo assim, a deformação máxima permitida no CFRP para impedir a ruptura por descolamento devido ao fissuramento não poderá exceder ao indicado na seguinte expressão:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,90 \cdot \varepsilon_{fu}$$

(2.8)

n número de camadas do reforço CFRP.

t_f espessura de cada camada de reforço CFRP.

E_f módulo de elasticidade do CFRP.

2.6 Dimensionamento do reforço CFRP

Quando aplicado, o sistema CFRP não está submetido a nenhum nível inicial de tensão. Contudo, o substrato ao qual ele será aderido já se encontra submetido a tensões de correntes da atuação do seu peso próprio, forças de protensão e/ou outros eventuais tipos de sollicitação existentes.

Com isso, o nível de tensões atuantes a fibra de carbono será diferente daquele que ocorre na fibra extrema do substrato sobre o qual o reforço é aplicado.

Para o conhecimento do nível de tensão ao qual o reforço será submetido será necessário que se conheça previamente o nível de tensão existente na superfície do substrato na hora de sua aplicação. Com o conhecimento desse nível de tensão conhece-se o nível de deformação existente na fibra extrema do concreto á qual será aderido o reforço.

Essa deformação pré-existente deverá ser subtraída da deformação da deformação final encontrada para a fibra de carbono para que se possa estabelecer o nível de tensão com o qual a fibra de carbono efetivamente trabalhará.

A deformação máxima permitida na fibra de carbono é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad (2.9)$$

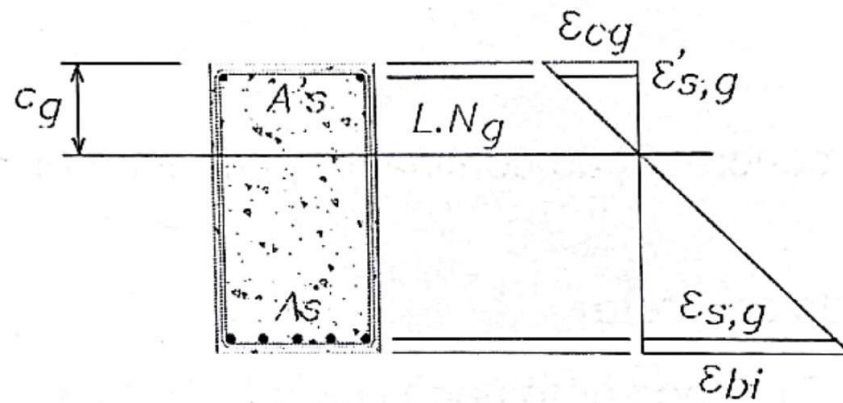
Onde,

ε_b – deformação na fibra considerada no reforço para o carregamento máximo.

ε_{bi} – deformação pré-existente a instalação do reforço de fibra de carbono.

A Figura 2 ilustra como deve ser determinada a deformação ε_{bi} a partir da análise elástica dos carregamentos existentes quando a instalação do sistema de reforço, que são, de modo geral, constituídos apenas por cargas permanentes. A deformação ε_{bi} é obtida por semelhança de triângulos.

FIGURA 2 - Deformação inicial de peso próprio.



Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.128)

O ACI 440.2R-17 recomenda que o reforço a flexão com sistemas compostos e estruturados com fibra de carbono seja calculado para o estado limite último. A análise para o estado limite último calcula a capacidade resistente da seção através da combinação das condições de equilíbrio das deformações, compatibilidade das tensões e o comportamento do concreto e dos demais materiais constituintes na ruptura.

Os critérios de dimensionamento à flexão no estado limite último estabelecem que a capacidade resistente à flexão seja maior que o esforço solicitado.

2.7 Nível de deformação do reforço com CFRP

Tornasse extremamente importante conhecer o nível de deformação no reforço executado com CFRP no estado limite último, em decorrência do fato de que o sistema CFRP é linearmente elástico até sua ruptura, o que faz com que o nível de deformação no sistema seja mandatório no dimensionamento do reforço (MACHADO; MACHADO, 2015, p. 132).

Com isso, a deformação máxima que poderá ser atingida no reforço com CFRP será determinada para as seguintes situações:

- situação de ruptura do concreto.
- situação de ruptura do sistema CFRP.
- situação na qual o sistema CFRP descola do substrato de concreto.

Com base nessas avaliações, a deformação efetiva que poderá ser atingida pelo reforço de CFRP é expressa da seguinte forma:

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

(2.10)

Sendo,

ε_{bi} deformação inicial da seção devido às cargas instaladas quando do reforço.

d_f profundidade efetiva do reforço CFRP.

A profundidade da linha neutra para a determinação da deformação correspondente ao estado de carregamento existente no elemento no instante da aplicação do reforço pode ser obtida seguindo recomendações da ABNT NBR 6118/2014, descritas abaixo:

1 – determina-se o valor de $M_{g,reforço}$, momento de cargas permanentes quando a aplicação do reforço.

2 – determina-se o valor de k com a seguinte equação:

$$k = \frac{M_{g,reforço}}{f_c \cdot b \cdot d^2}$$

(2.11)

3 – compara-se o valor de k encontrado com o valor de k_L :

se $k \leq k_L$ adota-se $k' = k$

se $k > k_L$ adota-se $k' = k_L$

para:

$f_{ck} < 35\text{MPa}$, $k_L = 0,320$

$f_{ck} > 35\text{MPa}$ $k_L = 0,269$

4 – a posição da linha neutra pode ser encontrada com a equação abaixo:

Para seções retangulares:

$$c = d \cdot \left(\frac{1 - \sqrt{1 - 2k'}}{0,8} \right)$$

(2.12)

Para seções “T”

$$c = d \cdot (1 - \sqrt{1 - k'})$$

(2.13)

5 – conhecido o valor de (c) determina-se o braço de alavanca:

$$z = d - \left(\frac{0,8 \cdot c}{2} \right)$$

(2.14)

2.8 Nível de tensão no reforço

A ACI 440.2R-17 limita o nível de tensão que pode ser atingido nos reforços com CFRP, 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 com a condição de comportamento perfeitamente elástico, conforme a seguinte equação:

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$$

(2.15)

2.9 Fator de redução da resistência dos sistemas CFRP

De acordo com Machado e Machado (2015, p. 133) uma das consequências de usar reforços com sistemas CFRP nas estruturas de concreto armado é a redução da ductilidade do elemento de original, sobre o qual o reforço foi aplicado. Em alguns casos essa perda é desprezível, mas seções que possam apresentar uma perda significativa de ductilidade devem ser analisadas.

Para elementos de concreto armados não protendido, a ductilidade adequada é atingida se a deformação no aço, no instante do rompimento do concreto ou descolamento ou delaminação do sistema CFRP seja, pelo menos 0,005.

O fator de redução da resistência ϕ :

$$\phi = 0,90 \text{ para } \varepsilon_f \geq 0,005$$

2.10 Sequência para cálculo de reforço a flexão com CFRP segundo o ACI 440.2R-17

Para reforçar uma viga de concreto armado utilizando sistemas compostos e estruturados com fibras de carbono devem ser efetuadas as seguintes verificações segundo Machado e Machado (2015, p.129):

– determinar o momento fletor máximo de cálculo do reforço que atuará na viga ($M_{ref.maj.}$)

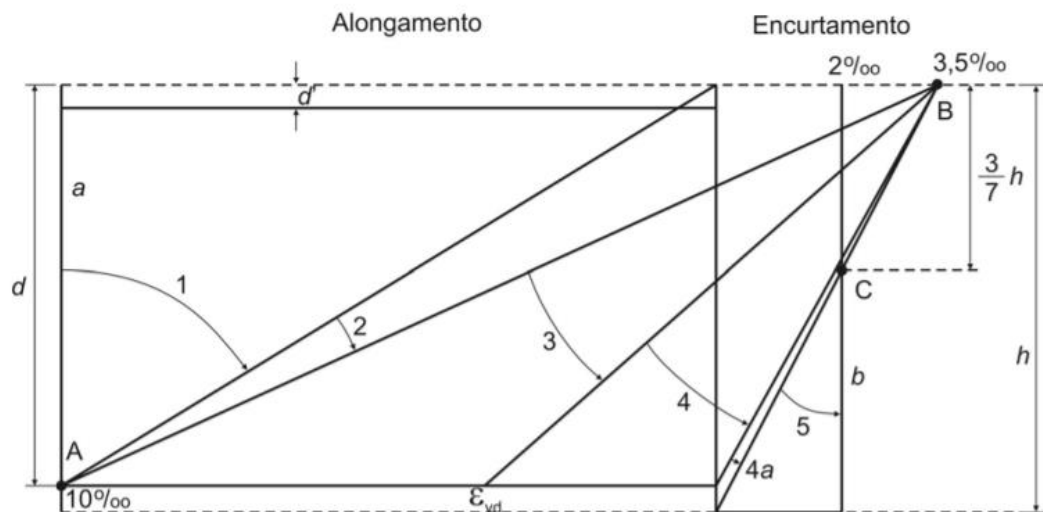
– determinar o momento fletor resistente de cálculo da viga considerando as características geométricas da seção e as características mecânicas dos materiais que a constitui ($M_{resist.}$).

– comparar ($M_{ref.maj.}$) com o ($M_{resist.}$). Se ($M_{resist.}$) > ($M_{ref.maj.}$) a viga não necessita de reforço. Entretanto se, ($M_{resist.}$) < ($M_{ref.maj.}$) a viga necessita de reforço.

– se a viga necessitar de reforço, deve ser determinado o modo de ruptura.

Se ($0 \leq x \leq x_b$), ou seja, domínios 2 e 3, o reforço deverá ser calculado para a condição de viga subarmada. Se ($x_b \leq x \leq d$), domínio 4, o reforço deverá ser calculado para a condição de viga superarmada conforme Figura 3.

FIGURA 3 - Domínios de dimensionamento do concreto armado.



Fonte: ABNT NBR 6118/2014

O próximo passo é o dimensionamento do reforço com CFRP seguindo os procedimentos abaixo (MACHADO; MACHADO, 2015, p. 129):

- Etapa 1: arbitrar a profundidade da linha neutra (c) em conformidade com o modo de ruptura.
- Etapa 2: calcular as deformações dos diversos materiais admitindo-se a linearidade da variação das mesmas.
- Etapa 3: calcular as tensões atuantes nos diversos materiais.

- Etapa 4: a partir do conhecimento das forças atuantes, devem ser feitas as verificações do equilíbrio das mesmas. Se o momento resistente encontrado no sistema reforçado for maior que o momento solicitante máximo de cálculo ($M_{ref.maj.}$) o processo está concluído.

Esse procedimento é iterativo, tendo em vista que a etapa 1 que determina o resultado final e a mesma é arbitrada, as condições de resistência necessária e economia pode ser simultaneamente atendidas ou não, com isso esse processo deve ser repetido quantas vezes necessário para alcançar tal objetivo.

Após concluir o processo iterativo deve ser feita a verificação de ductilidade do sistema CFRP.

2.11 Determinação do momento resistente do reforço

Para a determinação do momento resistente da viga reforçada com sistemas CFRP é levado em consideração os seguintes esforços:

F_c – força resultante da seção comprimida do concreto.

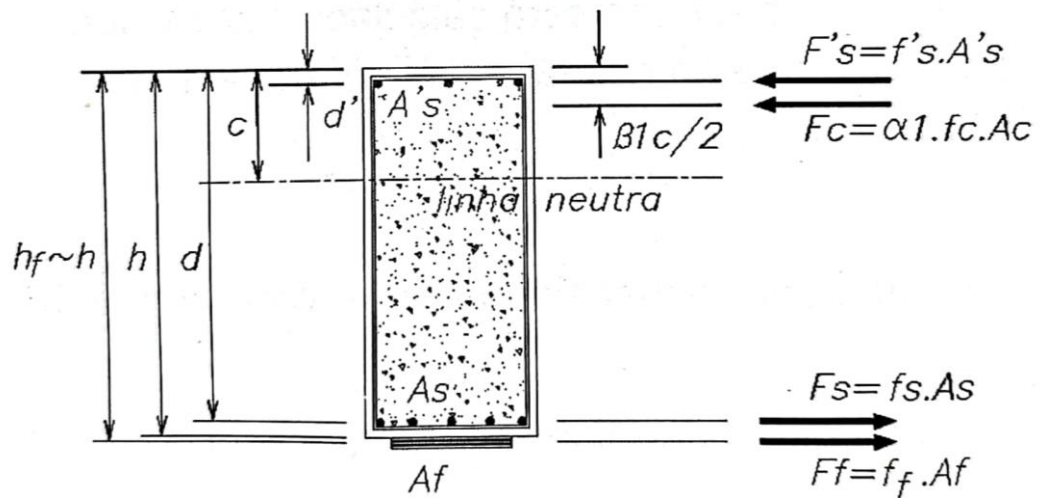
F'_s – força resultante da seção comprimida da armadura.

F_s – força resultante da seção tracionada da armadura.

F_f – força resultante da seção tracionada de fibra de carbono.

Essas forças resultantes citadas, assim como as suas localizações podem ser visualizadas na Figura 4.

FIGURA 4 - Determinação do momento resistente.



Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.130)

A capacidade resistente ao momento fletor de um elemento reforçado com CFRP pode ser expressa da seguinte forma:

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + A'_s \cdot f'_s \cdot \left(\frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d \right) \quad (2.16)$$

Sendo:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s < f_y \quad (2.17)$$

$$f'_s = E_s \cdot \varepsilon'_s < f_y \quad (2.18)$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{c,f} < F_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (2.19)$$

Ψ_f – coeficiente adicional de redução com valor 0,85.

A ACI 440.2R-17 10.2.10 define esse fator de redução (Ψ_f) com base nas análises de confiabilidade discutidas na seção 9.1 e que foram baseadas nas propriedades calibradas estatisticamente de resistência à flexão.

Sabendo -se que:

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad (2.20)$$

$$F'_s = A'_s \cdot f'_s$$

(2.21)

$$F_f = A_f \cdot f_{fe}$$

(2.22)

$$F_c = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c$$

(2.23)

A expressão acima pode ser reescrita assim:

$$M_n = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \Psi_f F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + F'_s \cdot \left(\frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d \right)$$

(2.24)

Admitindo-se que não exista armadura de aço para compressão a expressão do momento resistente pode ser simplificada para:

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

(2.25)

Ou, ainda

$$M_n = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \Psi_f F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

(2.26)

Considerando que,

$$F_f = A_f \cdot f_{fe}$$

(2.27)

$$f_{fe} = \varepsilon_f \cdot E_f = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \cdot E_f$$

(2.28)

$$\varepsilon_b = \varepsilon_c \cdot \left(\frac{h-c}{c} \right)$$

(2.29)

$$f_{fe} = \left[\varepsilon_c \cdot \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] \cdot E_f$$

(2.30)

$$F_f = A_f \cdot E_f \cdot \left[\varepsilon_c \cdot \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right]$$

(2.31)

O equilíbrio das forças é calculado através da determinação do nível de tensões dos materiais constituintes. Assim o equilíbrio interno das forças é satisfeito se, e somente se, for obedecida a expressão:

$$c = \frac{F_s + F_f}{F_c + F'_s} \quad (2.32)$$

Ou ainda, admitindo-se que não exista armadura de aço para compressão a expressão pode ser simplificada para:

$$c = \frac{F_s + F_f}{F_c} \quad (2.33)$$

Ou seja,

De acordo com Machado e Machado (2015, p. 132) a profundidade da linha neutra é encontrada ao satisfazer simultaneamente a equação (2.25) através da equação (2.26), assim estabelecendo o equilíbrio interno das forças e a compatibilidade das deformações.

2.12 Resistência final da peça reforçada

Os procedimentos de reforço estrutural exigem que o dimensionamento estrutural exceda os esforços majorados, conforme indicado abaixo (MACHADO; MACHADO, 2015, p. 126):

$$\phi M_n \geq M_u$$

Onde,

ϕ fator de redução da resistência.

M_n resistência de cálculo a flexão

M_u momento fletor de cálculo atuante na seção

2.13 Tensões no Aço submetido a cargas de serviço

O nível de tensão na armadura de aço pode ser calculado baseado na análise da seção fissurada de concreto reforçado com CFRP. Essa verificação pode ser feita a partir da seguinte equação:

$$f_{ss} = \frac{[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot (d_f - \frac{k \cdot d}{3})] \cdot (d - k \cdot d) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot (d - \frac{k \cdot d}{3}) \cdot (d - k \cdot d) + A_f \cdot E_f \cdot (d_f - \frac{k \cdot d}{3}) \cdot (d_f - k \cdot d)}$$

(2.34)

O valor de (k) pode ser calculado com a utilização da seguinte expressão:

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

(2.35)

Onde,

$$\rho_s = \frac{A_s}{A_{c,g}}$$

(2.36)

$$\rho_f = \frac{A_f}{A_{c,g}}$$

(2.37)

$A_{c,g}$ área bruta da seção transversal da peça

M_s é o momento devido a todas as cargas sustentadas, carga permanente e parcela da carga acidental ou móvel, mais o máximo momento produzido em ciclos de fadiga.

2.14 Tensões no CFRP submetido a cargas de serviços

O nível de tensões no reforço de CFRP pode ser calculado utilizando a equação a seguir:

$$f_{fs} = f_{ss} \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \cdot \left(\frac{d_f - k \cdot d}{d - k \cdot d} \right) - \varepsilon_{bi} \cdot E_f \leq 0,55 f_{fu}$$

(2.38)

2.15 Observações para a linha neutra

O dimensionamento do reforço a flexão de uma estrutura de concreto armado deve de ser feito de modo que seja evitada uma ruptura frágil do concreto. A ruptura dúctil do concreto sempre é desejável, pois essa condição permite que a estrutura dê sinais prévios de deformação permitindo que sejam feitas intervenções de recuperação em tempo.

Para proporcionar o adequado comportamento dúctil em vigas e lajes, a posição da linha neutra no ELU deve obedecer aos seguintes limites (ABNT NBR 6118:2014, pág. 91):

$$\frac{x}{d} \leq 0,45, \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa};$$

$$\frac{x}{d} \leq 0,45, \text{ para concretos com } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}.$$

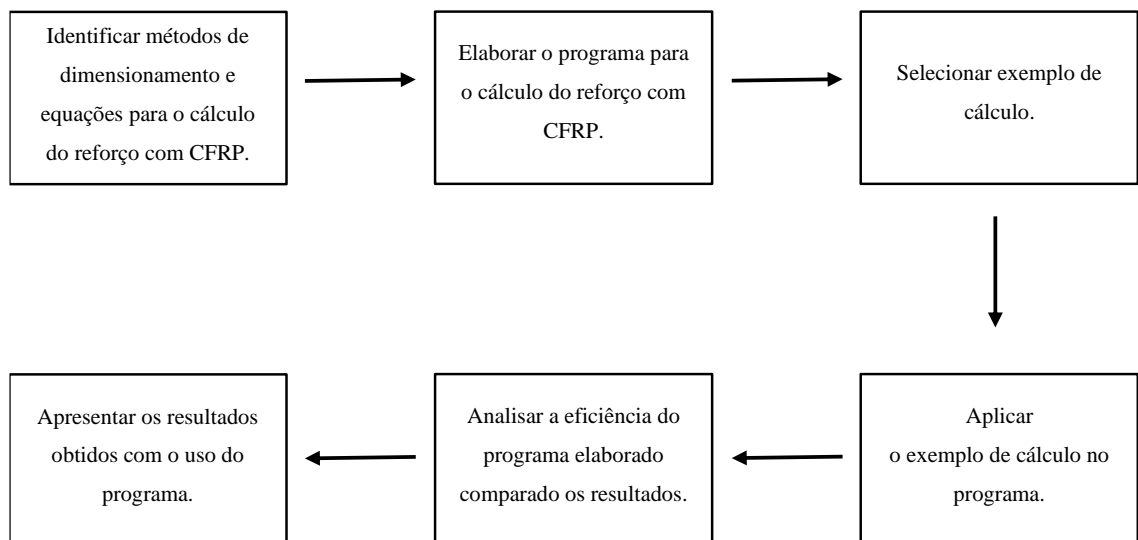
3 METODOLOGIA

Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica, afim de estudar os métodos de reforço de peças de concreto armado identificando as vantagens do uso do sistema CFRP. A pesquisa teve também o objetivo de coletar dados a respeito do dimensionamento do reforço com utilização dos sistemas compostos e estruturados com fibras de carbono. A partir disso, foi possível entender como o dimensionamento é realizado e pensar em formas de automatizar esse procedimento em planilhas eletrônicas do *Excel*, apresentando resultados se a fibra e suas propriedades físicas e geométricas escolhidas pelo projetista é capaz de atender aos novos esforços solicitados a viga de concreto armado, apresentando êxito no dimensionamento do reforço.

Logo em seguida, buscando validar o modelo elaborado, foram feitos testes com a utilização de um exemplo de cálculo proposto por Machado e Machado no livro “Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compostos FRP”.

A Figura 5, apresenta um fluxograma sobre a metodologia.

FIGURA 5 – Metodologia.



Fonte: O autor

3.1 Considerações para Programa para o Cálculo de Reforço à Flexão com CFRP

- Foi utilizado o software Excel para elaborar o programa;
- O programa foi desenvolvido com a utilização de equações propostas pela ACI 440.2R-17 e ABNT NBR 6118:2014;
- Para facilitar o preenchimento dos dados para o cálculo foi adicionado um quadro de descrevendo os dados de entrada;
- Ainda buscando facilitar o entendimento da forma correta de preenchimento foi adicionado uma figura que demonstra os dados referentes a geometria da seção e as áreas de armaduras;
- Tabelas para coletas de dados também foram adicionadas, com objetivo de tornar o processo mais ágil;

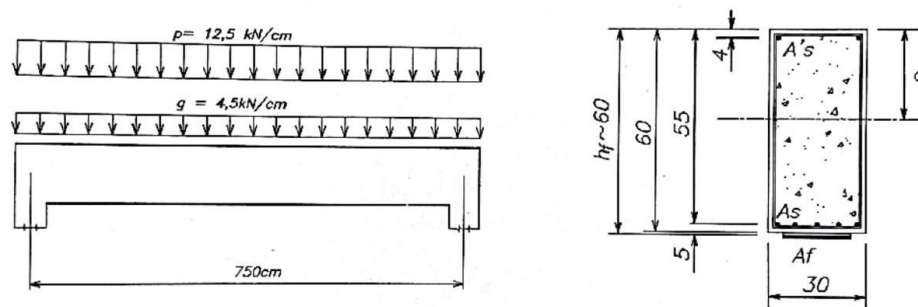
3.2 Exemplo de cálculo

O exemplo de cálculo proposto por Machado e Machado foi elaborado seguindo um roteiro de cálculo indicado pela ACI 440.2R-17. Apresentando o método de cálculo para reforçar uma viga de concreto armado com a utilização de sistema CFRP. O exemplo pode ser encontrado no livro intitulado Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compostos FRP, iniciando na página 135 e finalizando na página 141.

3.2.1 Análise do exemplo de cálculo proposto por Machado e Machado

O exemplo pede-se para reforçar com CFRP a viga apresentada na Figura 6 abaixo.

FIGURA 6 – Viga simplesmente apoiada para reforço.



Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.135)

Segue abaixo os dados do exemplo:

O carregamento de carga acidental da viga deverá ser ($p = 125 \text{ N/cm}$). Quando da aplicação do reforço a viga estará submetida ao carregamento de peso próprio de ($g = 45 \text{ N/cm}$),

o carregamento final da viga, carga permanente mais acidental, será de ($g + p = 170 \text{ N/cm}$). O momento resistente da viga é $M_{resist.} = 9.492 \text{ kN.m}$.

Sabe-se que a viga foi armada com ($A_s = 6,25 \text{ cm}$) e ($A'_s = 1,60 \text{ cm}^2$), aço CA-50 e concreto com ($f_{ck} = 27 \text{ MPa}$).

Considerar para o FRP ($E_f = 228000 \text{ MPa}$), ($\epsilon_{fu}^* = 0,017 \text{ mm/mm}$), ($f_{fu}^* = 3800 \text{ MPa}$) e ($t_f = 0,33 \text{ mm}$) e que a viga está inserida em ambiente com exposição ao interior.

A resolução do problema é dividida em etapas. Machado e Machado (2015, p.135) inicia a resolução determinando a deformação da viga submetida apenas ao seu peso próprio, ou seja, ($g = 4,5 \text{ kN/cm}$). Essa etapa de verificação é feita segundo os critérios da norma ABNT NBR-6118. Na Figura 7 seguindo critérios da ABNT NBR-6118 ele encontra o valor do braço de alavanca z .

FIGURA 7 – Determinação do valor do braço de alavanca z .

$$M_g = \frac{45 \cdot 750^2}{8} \cong 3164062 \text{ N.cm}$$

$$f'_c = \frac{0,85 \cdot 2700}{1,4} = 1639,4 \cong 1640 \text{ N/cm}^2 \text{ N/cm}^2$$

$$k = \frac{3164062 \cdot 1,4}{30,55^2 \cdot 1640} = 0,03 \rightarrow k' = k = 0,030$$

$$c = 55 \left(\frac{1 - \sqrt{1 - 0,030}}{0,8} \right) = 1,038 \text{ cm}$$

$$z = 55 - \frac{0,8 \cdot 1,038}{2} = 54,585 \text{ cm}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.136)

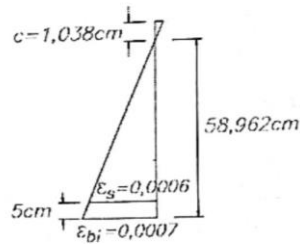
Na Figura 8, em sequência aos cálculos anteriores, podemos identificar que o valor da deformação ϵ_{bi} (deformação inicial devido ao peso próprio da viga) é obtida por semelhança de triângulos.

FIGURA 8 – Determinação valor da deformação ε_{bi} .

$$F_{s,c} = \frac{3164062.1,4}{54,585} \cong 81152 \text{ N}$$

$$f'_s = \frac{81152}{6,25} \cong 12985 \text{ N / cm}^2$$

$$\varepsilon_s = \frac{12985}{21000000} = 0,0006 = 0,6\text{‰}$$



$$\varepsilon_{bi} = 0,0006 \cdot \frac{58,962}{53,962} = 0,0007$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.136)

Por fim podemos verificar na Figura 9, que a viga necessita ser reforçada.

FIGURA 9 – Verificação da necessidade de reforço.

$$M_{p,ref.} = \frac{1250.7,5^2}{8} = 8789 \text{ kN.cm}$$

$$M_{g;p,ref.} = 3164 + 8789 = 11953 \text{ kN.cm} > M_{res.} = 9492 \text{ kN.cm} \text{ – exige reforço}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.136)

De acordo com Machado e Machado (2015, p.137) a resolução do problema consiste no atendimento da igualdade vista na Figura 10 abaixo:

FIGURA 10 – Equilíbrio do sistema de força.

$$c = \frac{F_s + F_f}{F_c + F_s'}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.137)

Nessa etapa seguinte o problema é resolvido com a utilização das recomendações da norma ACI 440.2R-17 (MACHADO; MACHADO, 2015, p. 137). Ele começa essa etapa resolvendo algumas equações e apresentando dados necessários para resolução de outras equações mais à frente na etapa de cálculo do reforço, conforme Figura 11.

FIGURA 11 – Resolução de equações.

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \cdot \frac{f_c'}{7} = 1,05 - 0,05 \cdot \frac{27}{7} = 0,857$$

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c'} = 4700 \cdot \sqrt{27} = 24221$$

$$A_s = 5.1,25 = 6,25 = 62,5 \text{ mm}^2$$

$$\varepsilon_{bi} = 0,0007$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.137)

Para a primeira tentativa de cálculo, admite-se os seguintes valores:

$$n = 2$$

$$t_f = 0,33 \text{ mm}$$

$$b_f = 270 \text{ mm}$$

$$A_f = 0,66 \cdot 270 = 178,20 \text{ mm}^2$$

Na Figura 12 ele verifica se deformação máxima permitida no CFRP para impedir a ruptura por descolamento devido ao fissuramento atende ao estabelecido na ACI 440.2R-17.

FIGURA 12 – Verificação da deformação máxima permitida no CFRP.

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{27}{2.228000 \cdot 0,33}} = 0,0055$$

$$\varepsilon_{fd} = 0,0055 \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} = 0,9 \cdot (0,95 \cdot 0,017) = 0,0144 \quad \text{OK!}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.137)

É arbitrado o valor de $c=0,25 \cdot d$, ou seja, $c=0,25 \cdot 550=137,50\text{mm}$. Com isso é verificado nas Figura 13 e Figura 14 se as deformações máximas efetivas nos materiais atendem ao determinado pela norma já citada.

FIGURA 13 – Verificação da deformação máxima permitida nos materiais – parte 01.

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

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left(\frac{600 - 137,5}{137,5} \right) - 0,0007 = 0,0094 \leq \varepsilon_{fd} = 0,0055 \quad \text{não OK! } \checkmark$$

Dessa forma, $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0,0055 \checkmark$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right) = (0,0055 + 0,0007) \cdot \left(\frac{137,5}{600 - 137,5} \right) = 0,0018$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) = (0,0055 + 0,0007) \cdot \left(\frac{550 - 137,5}{600 - 137,5} \right) = 0,0055$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s = 210000 \cdot 0,0055 = 1161 \text{ N/mm}^2$$

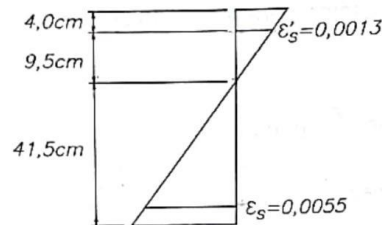
$$f_s = 1161 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_y = 435 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{não OK!}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.137)

FIGURA 14 – Verificação da deformação máxima permitida nos materiais – parte 02.

Deverá ser, então, adotado para a tensão no aço: $f_s = 435 \frac{N}{mm^2}$

$$f_e = E_f \cdot \epsilon_{fe} = 228000 \cdot 0,0055 = 1254 \text{ N/mm}^2$$



Por semelhança de triângulos, obtemos a deformação do aço em compressão:

$$\epsilon_s = 0,0013$$

$$f'_s = E_s \cdot \epsilon'_s = 210000 \cdot 0,0013 = 264 \frac{N}{mm^2} \leq f_y = 435 \frac{N}{mm^2}$$

Deverá ser, então, adotado para a tensão no aço: $f'_s = 264 \frac{N}{mm^2}$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.138)

Nessa etapa, Figura 15, através do cálculo do equilíbrio das forças resultantes é verificado que a profundidade da linha neutra de cálculo não converge com a linha de cálculo arbitrada, se fazendo necessário realizar uma nova tentativa arbitrando-se um novo valor para a razão $\frac{c}{d}$.

FIGURA 15 – Equilíbrio das forças resultantes.

Cálculo do Equilíbrio das Forças Resultantes:

$$\epsilon'_c = \frac{1,71 \cdot f'_c}{E_c} = \frac{1,71 \cdot 27}{24221} = 0,0019$$

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \epsilon'_c - \epsilon_c}{6 \cdot \epsilon'_c - 2 \cdot \epsilon_c} = \frac{4 \cdot 0,0019 - 0,0018}{6 \cdot 0,0019 - 2 \cdot 0,0018} = 0,7436$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \epsilon'_c \cdot \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \epsilon_c^2} = \frac{3 \cdot 0,0019 \cdot 0,0018 - 0,0018^2}{3 \cdot 0,7436 \cdot 0,0019^2} = 0,8717$$

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_e}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} = \frac{6,25 \cdot 4350 + 1,782 \cdot 12540}{0,8717 \cdot 270 \cdot 0,7436 \cdot 30} = 9,434 \text{ cm}$$

$$c_{calc.} = 94,340 \text{ mm} = c_{arb.} = 137,5 \text{ mm} \quad \text{não convergiu!}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.138)

Para a nova tentativa são admitidos os seguintes valores:

$$c=0,20.d, \text{ ou seja } c=0,20.550=110,00 \text{ mm.}$$

$$n = 2$$

$$t_f = 0,33 \text{ mm}$$

$$b_f = 270 \text{ mm}$$

$$A_f = 0,66 \cdot 270 = 178,20 \text{ mm}^2$$

Na Figura 16 ele verifica novamente se deformação máxima permitida no CFRP para impedir a ruptura por descolamento devido ao fissuramento atende ao estabelecido na ACI 440.2R-17. Resultando no mesmo valor, pois não foi alterado o valor de n.

FIGURA 16 – Nova verificação da deformação máxima permitida no CFRP.

$$\epsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{27}{2.228000 \cdot 0,33}} = 0,0055$$

$$\epsilon_{fd} = 0,0055 \leq 0,9 \cdot \epsilon_{fu} = 0,9 \cdot 0,016 = 0,0144 \quad \text{OK!}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.138)

Com os novos valores para a profundidade da linha neutra determinado é novamente calculado nas Figura 17 e Figura 18 e as deformações e tensões máximas efetivas nos materiais e verificado se as mesmas atendem aos parâmetros estabelecidos na norma.

FIGURA 17 – Nova verificação da deformação máxima permitida nos materiais – parte 01.

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

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left(\frac{600 - 110}{110} \right) - 0,0007 = 0,0127 \leq \varepsilon_{fd} = 0,0055 \quad \text{não OK!}$$

Dessa forma, $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0,0055$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right) = (0,0055 + 0,0007) \cdot \left(\frac{110}{600 - 110} \right) = 0,0014$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) = (0,0055 + 0,0007) \cdot \left(\frac{550 - 110}{600 - 110} \right) = 0,0056$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s = 210000 \cdot 0,0056 = 1169 \text{ N/mm}^2$$

$$f_s = 1169 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_y = 435 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{não OK}$$

deverá ser, então, adotado para a tensão no aço: $f_s = 435 \text{ N/mm}^2$

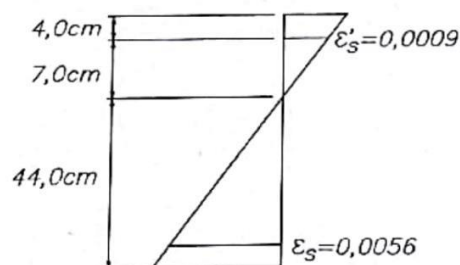
Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.139)

FIGURA 18 – Nova verificação da deformação máxima permitida nos materiais – parte 02.

$$f_e = E_r \cdot \varepsilon_{fe} = 228000 \cdot 0,0055 = 1254 \text{ N/mm}^2$$

Por semelhança de triângulos obtemos a deformação do aço em compressão:

$$\varepsilon'_s = 0,0009$$



$$f'_s = E_s \cdot \varepsilon'_s = 210000 \cdot 0,0009 = 189 \text{ N/mm}^2 \leq f_y = 435 \text{ N/mm}^2$$

Deverá ser, então, adotado para a tensão no aço: $f'_s = 189 \text{ N/mm}^2$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.139)

É então calculado novamente o equilíbrio das forças resultantes para o novo valor da linha neutra arbitrada, Figura 19 e Figura20. Desta vez é verificado que a profundidade da linha neutra de cálculo converge com a linha neutra arbitrada. Podendo partir para a próxima etapa do cálculo do reforço, a verificação da contribuição do aço para a flexão Figura 21.

FIGURA 19 – Nova verificação do equilíbrio das forças resultantes – primeira parte.

Cálculo do Equilíbrio das Forças Resultantes:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,71.f'_c}{E_c} = \frac{1,71.27}{24221} = 0,0019$$

$$\beta_1 = \frac{4.\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6.\varepsilon'_c - 2.\varepsilon_c} = \frac{4.0,0019 - 0,0014}{6.0,0019 - 2.0,0014} = 0,7209$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.139)

FIGURA 20 – Nova verificação do equilíbrio das forças resultantes – segunda parte.

$$\alpha_1 = \frac{3.\varepsilon'_c.\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3.\beta_1.\varepsilon_c'^2} = \frac{3.0,0019.0,0014 - 0,0014^2}{3.0,7209.0,0019^2} = 0,7711$$

$$c = \frac{A_s.f_s + A_f.f_e}{\alpha_1.f'_c.\beta_1.b} = \frac{6,25.4350 + 1,782.12540}{0,7711.270.0,7209.30} = 11,001\text{cm}$$

$$c_{\text{calc.}} = 110,01 \text{ mm} = c_{\text{arb.}} = 110,00 \text{ mm} \quad \text{convergiu!}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.140)

FIGURA 21 – Verificação da contribuição do aço para a flexão.

Contribuição do aço para a flexão:

$$M_{ns} = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 6,25 \cdot 4350 \left(55 - \frac{0,7209 \cdot 11}{2} \right) = 1387515 \text{ kgf.cm}$$

$$M_{nr} = A_r \cdot f_{re} \cdot \left(d_r - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 1,782 \cdot 12540 \left(60 - \frac{0,7209 \cdot 11}{2} \right) = 1252175 \text{ kgf.cm}$$

$$\phi \cdot M_n = \phi [M_{ns} + \psi \cdot M_{nr}] = 0,9 [1387515 + 0,85 \cdot 1252175] = 2206677 \text{ kgf.cm}$$

$$\phi \cdot M_n = 2206677 \text{ kgf.cm} > M_u = 1785900 \text{ kgf.cm}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.140)

Machado e Machado (2015, p. 140) observa que por se tratar de um resultado obtido arbitrando-se as dimensões da lâmina e do número de camadas, demonstrando que o processo é iterativo (e por tentativas) cabe ao projetista determinar o nível de refinamento que ele deseja para o seu dimensionamento.

Para finalizar, é feito a verificação das tensões em serviço na armadura de aço e no CFRP. Primeiro é calculado o nível de tensões na armadura de aço e por tratar de uma equação muito extensa e com muitos parâmetros, ela é dividida em algumas partes. Na primeira parte, Figura 22, calcula-se somente o valor de k.

FIGURA 22 – Determinação do valor de k.

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_r \cdot \frac{E_r}{E_c} \right)^2 + 2 \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_r \cdot \frac{E_r}{E_c} \left(\frac{d_r}{d} \right) \right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_r \cdot \frac{E_r}{E_c} \right)$$

$$\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} = \frac{6,25}{1800} \cdot \frac{2100000}{244210} = 0,030$$

$$\rho_r \cdot \frac{E_r}{E_c} = \frac{1,782}{1800} \cdot \frac{2280000}{244210} = 0,009$$

$$\frac{d_r}{d} = \frac{60}{55} = 1,091$$

$$k = \sqrt{(0,030 + 0,009)^2 + 2(0,030 + 0,009 \cdot 1,091)} - (0,030 + 0,009) = 0,246$$

$$k_d = 0,246 \cdot 55 = 13,524 \text{ cm}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.140)

Tomado o valor de k é então calculado e verificado o nível de tensão na armadura de aço, conforme Figura 23 e Figura 24.

FIGURA 23 – Determinação tensão na armadura de aço – primeira parte.

$$f_{ss} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_r \cdot E_r \left(d_r - \frac{k \cdot d}{3} \right) \right] \cdot (d - k \cdot d) E_s}{A_s \cdot E_s \left(d - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d - k \cdot d) + A_r \cdot E_r \left(d_r - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d_r - k \cdot d)}$$

$$\varepsilon_{bi} \cdot A_r \cdot E_r \left(d_r - \frac{k \cdot d}{3} \right) = 0,0007 \cdot 1,782 \cdot 2280000 \left(60 - \frac{13,524}{3} \right) \cong 157823$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.140)

FIGURA 24 – Determinação e verificação da tensão na armadura de aço – segunda parte.

$$(d - k \cdot d) E_s = (55 - 13,524) \cdot 2100000 \cong 87099600$$

$$A_s \cdot E_s \left(d - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d - k \cdot d) = 6,25 \cdot 2100000 \left(55 - \frac{13,524}{3} \right) (55 - 13,524) = 2,749^{10}$$

$$A_r \cdot E_r \left(d_r - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d_r - k \cdot d) = 1,782 \cdot 2280000 \left(60 - \frac{13,524}{3} \right) (60 - 13,524) = 1,048^{10}$$

$$M_s = \frac{17.750^2}{8} \cong 1195312 \text{ kgf.cm}$$

$$f_{ss} = \frac{[1195312 + 157823] \cdot 87099600}{2,749^{10} + 1,048^{10}} = 3104,371 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 0,8 \cdot 5000 = 4000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{OK!}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.141)

Na Figura 25 é verificado a tensão no CFRP. É confirmando que todas as tensões estão dentro dos parâmetros de verificação concluiu-se o exemplo de aplicação.

FIGURA 25 – Determinação e verificação da tensão no CFRP.

$$f_{fs} = f_{ss} \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \cdot \left(\frac{d_f - k \cdot d}{d - k \cdot d} \right) - \varepsilon_{bi} \cdot E_f \leq 0,55 f_{tu}$$

$$f_{fs} = 3104,371 \cdot \left(\frac{2280000}{2100000} \right) \cdot \left(\frac{60 - 13,524}{55 - 13,524} \right) - 0,0007 \cdot 2280000 = 2180,774 \text{ kgf / cm}^2$$

$$f_{fs} = 2180,774 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 0,55 \cdot f_{tu} = 0,55 \cdot (0,9 \cdot 3800) = 1881 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{OK!}$$

Fonte: MACHADO; MACHADO (2015, p.141)

4 RESULTADOS

4.1 Programa para o cálculo de reforço à flexão com CFRP

O programa elaborado possui oito divisões, sendo essas referentes a entrada de dados, tabela para obter o coeficiente de redução ambiental, verificação quanto a necessidade de reforço, dados de cálculo, verificações para o equilíbrio do sistema de forças, equilíbrio do sistema de forças, contribuição do aço para flexão e verificação das tensões de serviço na armadura de aço e no CFRP.

4.1.1 Entrada de dados

Ao abrir a planilha do programa de cálculo de reforço à flexão com CFRP o projetista necessita inserir todos os dados referentes a viga de concreto armado a qual se pretende reforçar, assim como dados da fibra que será usada no reforço. A apresentação inicial da planilha pode ser visualizada na Figura 26.

Para facilitar o preenchimento dos dados necessários foi adicionado uma imagem detalhada em Figura 27, que apresenta informações quanto a geometria da seção e as áreas de armaduras.

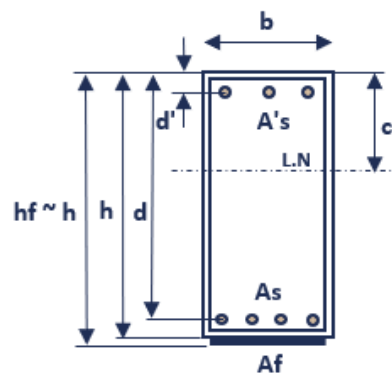
Para agilizar o processo de preenchimento foi adicionado também um quadro com os esclarecimentos sobre cada dado a ser adicionado, o mesmo traz não só a descrição dos dados, mas também informações de onde podem ser encontrados. Detalhe do quadro de descrição dos dados em Figura 28.

FIGURA 26 – Apresentação inicial do programa de cálculo de reforço à flexão com CFRP.

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DE REFORÇO À FLEXÃO COM CFRP																																																							
ENTRADA DE DADOS																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #d9ead3;"> <th colspan="2" style="text-align: left;">GEOMETRIA DA PEÇA (CM)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>h =</td><td></td></tr> <tr><td>d =</td><td></td></tr> <tr><td>d' =</td><td></td></tr> <tr><td>b =</td><td></td></tr> <tr><td>L =</td><td></td></tr> </tbody> </table>	GEOMETRIA DA PEÇA (CM)		h =		d =		d' =		b =		L =																																												
GEOMETRIA DA PEÇA (CM)																																																							
h =																																																							
d =																																																							
d' =																																																							
b =																																																							
L =																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #d9ead3;"> <th colspan="2" style="text-align: left;">PROPRIEDADES MECÂNICAS (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>fck =</td><td></td></tr> <tr><td>fyk =</td><td></td></tr> </tbody> </table>	PROPRIEDADES MECÂNICAS (MPa)		fck =		fyk =		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #d9ead3;"> <th colspan="2" style="text-align: left;">DESCRIZAÇÃO DOS DADOS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>h</td><td>- altura total da viga</td></tr> <tr><td>hf</td><td>- altura total da viga mais a espessura nominal da camada de reforço</td></tr> <tr><td>d</td><td>- altura útil da viga ou distancia do C.G. da armadura tracionada até a borda mais comprimida</td></tr> <tr><td>d'</td><td>- distancia do C.G. da armadura comprimida até a borda mais comprimida</td></tr> <tr><td>b</td><td>- largura da viga</td></tr> <tr><td>L</td><td>- comprimento longitudinal da viga</td></tr> <tr><td>fck</td><td>- resistencia característica do concreto</td></tr> <tr><td>fyk</td><td>- resistencia característica do aço</td></tr> <tr><td>f^f fu</td><td>- tensão máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)</td></tr> <tr><td>ε^f fu</td><td>- deformação máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)</td></tr> <tr><td>tf</td><td>- espessura nominal da camada de reforço (mm)</td></tr> <tr><td>bf</td><td>- largura da base da camada de reforço (mm)</td></tr> <tr><td>n</td><td>- numero de camada de reforço (valor arbitrado)</td></tr> <tr><td>Ef</td><td>- modulo de elasticidade da fibra (fornecido pelo fabricante) obs:</td></tr> <tr><td colspan="2">zerar valor se não tiver essa informação</td></tr> <tr><td>c/d</td><td>- valor arbitrado para obter a linha neutra arbitraria c/d ≤</td></tr> <tr><td colspan="2">obs: c/d ≤ 0,45, para concretos com fck ≤ 50 Mpa</td></tr> <tr><td colspan="2">0,45, para concretos com 50 MPa < fck ≤ 90 MPa</td></tr> <tr><td>Ce</td><td>- coeficiente de redução ambiental obtido na tabela 01</td></tr> <tr><td>p</td><td>- carga acidental da viga</td></tr> <tr><td>g</td><td>- carga permanente da viga</td></tr> <tr><td>As</td><td>- área de aço da armadura de tração</td></tr> <tr><td>A's</td><td>- área de aço da armadura de compressão</td></tr> </tbody> </table>	DESCRIZAÇÃO DOS DADOS		h	- altura total da viga	hf	- altura total da viga mais a espessura nominal da camada de reforço	d	- altura útil da viga ou distancia do C.G. da armadura tracionada até a borda mais comprimida	d'	- distancia do C.G. da armadura comprimida até a borda mais comprimida	b	- largura da viga	L	- comprimento longitudinal da viga	fck	- resistencia característica do concreto	fyk	- resistencia característica do aço	f ^f fu	- tensão máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)	ε ^f fu	- deformação máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)	tf	- espessura nominal da camada de reforço (mm)	bf	- largura da base da camada de reforço (mm)	n	- numero de camada de reforço (valor arbitrado)	Ef	- modulo de elasticidade da fibra (fornecido pelo fabricante) obs:	zerar valor se não tiver essa informação		c/d	- valor arbitrado para obter a linha neutra arbitraria c/d ≤	obs: c/d ≤ 0,45, para concretos com fck ≤ 50 Mpa		0,45, para concretos com 50 MPa < fck ≤ 90 MPa		Ce	- coeficiente de redução ambiental obtido na tabela 01	p	- carga acidental da viga	g	- carga permanente da viga	As	- área de aço da armadura de tração	A's	- área de aço da armadura de compressão
PROPRIEDADES MECÂNICAS (MPa)																																																							
fck =																																																							
fyk =																																																							
DESCRIZAÇÃO DOS DADOS																																																							
h	- altura total da viga																																																						
hf	- altura total da viga mais a espessura nominal da camada de reforço																																																						
d	- altura útil da viga ou distancia do C.G. da armadura tracionada até a borda mais comprimida																																																						
d'	- distancia do C.G. da armadura comprimida até a borda mais comprimida																																																						
b	- largura da viga																																																						
L	- comprimento longitudinal da viga																																																						
fck	- resistencia característica do concreto																																																						
fyk	- resistencia característica do aço																																																						
f ^f fu	- tensão máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)																																																						
ε ^f fu	- deformação máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)																																																						
tf	- espessura nominal da camada de reforço (mm)																																																						
bf	- largura da base da camada de reforço (mm)																																																						
n	- numero de camada de reforço (valor arbitrado)																																																						
Ef	- modulo de elasticidade da fibra (fornecido pelo fabricante) obs:																																																						
zerar valor se não tiver essa informação																																																							
c/d	- valor arbitrado para obter a linha neutra arbitraria c/d ≤																																																						
obs: c/d ≤ 0,45, para concretos com fck ≤ 50 Mpa																																																							
0,45, para concretos com 50 MPa < fck ≤ 90 MPa																																																							
Ce	- coeficiente de redução ambiental obtido na tabela 01																																																						
p	- carga acidental da viga																																																						
g	- carga permanente da viga																																																						
As	- área de aço da armadura de tração																																																						
A's	- área de aço da armadura de compressão																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #d9ead3;"> <th colspan="2" style="text-align: left;">PROPRIEDADES CARACTERÍSTICA DA FIBRA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>f^f fu =</td><td></td></tr> <tr><td>ε^f fu =</td><td></td></tr> <tr><td>tf =</td><td></td></tr> <tr><td>bf =</td><td></td></tr> <tr><td>n =</td><td></td></tr> <tr><td>Ef =</td><td></td></tr> <tr><td>c/d =</td><td></td></tr> <tr><td>Ce =</td><td></td></tr> </tbody> </table>	PROPRIEDADES CARACTERÍSTICA DA FIBRA		f ^f fu =		ε ^f fu =		tf =		bf =		n =		Ef =		c/d =		Ce =																																						
PROPRIEDADES CARACTERÍSTICA DA FIBRA																																																							
f ^f fu =																																																							
ε ^f fu =																																																							
tf =																																																							
bf =																																																							
n =																																																							
Ef =																																																							
c/d =																																																							
Ce =																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #d9ead3;"> <th colspan="2" style="text-align: left;">CARREGAMENTO (N/CM)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>p =</td><td></td></tr> <tr><td>g =</td><td></td></tr> </tbody> </table>	CARREGAMENTO (N/CM)		p =		g =																																																		
CARREGAMENTO (N/CM)																																																							
p =																																																							
g =																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #d9ead3;"> <th colspan="2" style="text-align: left;">ÁREA DE ARMADURA (CM²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>As</td><td></td></tr> <tr><td>A's</td><td></td></tr> </tbody> </table>	ÁREA DE ARMADURA (CM ²)		As		A's																																																		
ÁREA DE ARMADURA (CM ²)																																																							
As																																																							
A's																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #d9ead3;"> <th colspan="2" style="text-align: left;">MOMENTO RESISTENTE DA VIGA (KN.M)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>M_{res.}</td><td></td></tr> </tbody> </table>	MOMENTO RESISTENTE DA VIGA (KN.M)		M _{res.}																																																				
MOMENTO RESISTENTE DA VIGA (KN.M)																																																							
M _{res.}																																																							

Fonte: O autor

FIGURA 27 – Detalhe da seção transversal da viga.



Fonte: O autor

FIGURA 28 – Detalhe da seção transversal da viga.

DESCRIÇÃO DOS DADOS	
h	- altura total da viga
h _f	- altura total da viga mais a espessura nominal da camada de reforço
d	- altura útil da viga ou distancia do C.G da armadura tracionada até a borda mais comprimida
d'	- distancia do C.G da armadura comprimida até a borda mais comprimida
b	- largura da viga
L	- comprimento longitudinal da viga
f _{ck}	- resistencia caracteristica do concreto
f _{yk}	- resistencia caracteristica do aço
f* f _u	- tensão máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)
e* f _u	= deformação máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)
t _f	- espessura nominal da camada de reforço (mm)
b _f	- largura da base da camada de reforço (mm)
n	- numero de camada de reforço (valor arbitrado)
E _f	- modulo de elasticidade da fibra (fornecido pelo fabricante) obs: zerar valor se não tiver essa informação
c/d	- valor arbitrado para obter a linha neutra arbitrária
obs:	c/d ≤ 0,45, para concretos com f _{ck} ≤ 50 Mpa 0,45, para concretos com 50 MPa < f _{ck} ≤ 90 MPa
C _E	- coeficiente de redução ambiental obtido na tabela 01
p	- carga acidental da viga
g	- carga permanente da viga
A _s	- área de aço da armadura de tração
A' _s	- área de aço da armadura de compressão

Fonte: O autor

4.1.2 Tabela para obter o coeficiente de redução ambiental

Nessa divisão o projetista pode encontrar os dados de C_E sem que precise consultar a norma. Detalhamento em Figura 29.

FIGURA 29 – Detalhe da seção transversal da viga.

TABELA PARA OBTEN O COEFICIENTE DE REDUÇÃO AMBIENTAL		
TABELA 01		
Condição de exposição	Tipo da Fibra	Coeficiente de Redução Ambiental C _E
Exposição ao interior	Carbono	0.95
	Vidro	0.75
	Aramida	0.85
Exposição ao exterior (pontes, cais e garagens desprotegidas)	Carbono	0.85
	Vidro	0.75
	Aramida	0.65
Ambientes agressivos	Carbono	0.85
	Vidro	0.5
	Aramida	0.7

Table 9.1 - ACI 440.2R-08 - Pág 24

Fonte: O autor

4.1.3 Verificação quanto a necessidade de reforço

Nessa etapa será calculado se realmente a viga necessita ser reforçada. O cálculo é feito analisando o valor do momento resistente em comparação ao momento resistente. Se solicitado for maior que momento que a viga é capaz de resistir, o programa avisará que existe a necessidade de reforçar. Inicialmente ao abrir o programa, quando não há nenhum dado preenchido o programa exibe uma mensagem avisando quanto a necessidade do preenchimento dos dados, conforme Figura 30.

FIGURA 30 – Verificação quanto a necessidade de reforço.

VERIFICAÇÃO QUANTO A NECESSIDADE DE REFORÇO			
Mg = 0 KN.cm	Mp = 0 KN.cm	Mg + Mp = 0.00 KN.cm	Mres. = 0 KN.cm
RESULTADO = POR FAVOR PREENCHER ENTRADA DE DADOS			

Fonte: O autor

4.1.4 Dados de cálculo

Essa divisão é destinada ao levantamento de todos os dados necessários para o cálculo do dimensionamento. Eles são gerados automaticamente, a partir do preenchimento correto dos dados de entrada. Realizando todas as conversões necessárias de forma automatizada. Detalhe em Figura 31.

FIGURA 31 – Exemplo dos dados de cálculo preenchidos.

DADOS DE CÁLCULO			
f'c = 1639 N/CM ²	fs = 12983 N/cm ²	Ef = 223529 Mpa	e's = 0.0009
K = 0.030	es = 0.0006	Ef = 228000 Mpa	e'c = 0.0019
K' = 0.030	ebi = 0.0007	c = 110.00 mm	β1 = 0.7209
c = 1.031 cm	β1 = 0.857	Af = 178.2 mm ²	α1 = 0.7711
z = 54.587 cm	Ec = 24422	fe = 1254 N/mm ²	ec = 0.00140
F _{s,c} = 81147 N	As = 62.5 mm ²		es = 0.0055
ps.Es/Ec = 0.03	As.Es.(d-kd/3).(d-kd) = 2.94E+10		
pf.Ef/Ec = 0.009	Af.Ef.(df-kd/3).(df-kd) = 1.11E+10		
df/d = 1.091	Ms = 1195313 kgf.cm		
k = 0.205			
kd = 11.29296 cm			
ebi.Af.Ef.(df-kd/3) = 154350			
(d-kd)*Es = 91784781			

Fonte: O autor

4.1.5 Verificações para o equilíbrio do sistema de forças

Nessa etapa são verificadas se as tensões e deformações máximas atendem aos parâmetros da norma, caso não atenda o programa informa com “não OK” e substitui pelo valor permitido preconizado pela norma. Detalhe em Figura 32.

FIGURA 32 – Exemplo das verificações para o equilíbrio do sistema de forças.

VERIFICAÇÕES PARA O EQUILÍBRIO DO SISTEMA DE FORÇAS			
VALOR ARBITRADO PARA LINHA NEUTRA: 110.00 mm			
$\epsilon_{fd} =$	0.0055	0.0055 <	0.0145 OK!
$\epsilon_{fe} =$	0.0127	0.0127 >	0.0055 NÃO OK!
DESTA FORMA	$\epsilon_{fe} = 0.0055$		
$f_s =$	1155 N/mm ²	1155 N/mm ² >	435 N/mm ² NÃO OK!
DESTA FORMA	$f_s = 435$ N/mm ²		
$f'_s =$	185 N/mm ²	185 N/mm ² <	435 N/mm ² OK!
DESTA FORMA	$f'_s = 185$ N/mm ²		

Fonte: O autor

4.1.6 Equilíbrio do sistema de forças

Uma das principais etapas do programa, nela ele é capaz de avisar se a linha neutra calculada convergiu ou não com linha de neutra arbitrada. Essa etapa contém uma observação em que instrui o projetista a adotar um novo valor para a razão $\frac{c}{d}$ caso não tenha convergido. Detalhe em Figura 33 e Figura 34.

FIGURA 33 – Exemplo do equilíbrio do sistema de forças – linha neutra convergindo.

EQUILÍBRIO DO SISTEMA DE FORÇAS			
VALOR DE CALCULO DA LINHA NEUTRA: 11.00 cm			
c cal. =	11.00 cm	=	c arb. = 11.00 cm CONVERGIU!

OBS: Se não atender a condição de equilíbrio do sistema de forças resultando em valores diferentes para a profundidade da linha neutra c, adotar novo valor para a razão c/d

Fonte: O autor

FIGURA 34 – Exemplo do equilíbrio do sistema de forças – linha neutra não convergindo.

EQUILÍBRIO DO SISTEMA DE FORÇAS				
VALOR DE CÁLCULO DA LINHA NEUTRA:	9,43 cm			
c cal. =	9,43 cm	≠	c arb. =	13,75 cm NÃO CONVERGIU!
OBS: Se não atender a condição de equilíbrio do sistema de forças resultando em valores diferentes para a profundidade da linha neutra c, adotar novo valor para a razão c/d				

Fonte: O autor

4.1.7 Contribuição do aço para flexão

Nessa etapa o projetista pode verificar se a contribuição do aço atende aos requisitos da norma, conforme Figura 35.

FIGURA 35 – Exemplo de em que a contribuição do aço atende aos requisitos.

CONTRIBUIÇÃO DO AÇO PARA FLEXÃO			
Mns =	1387515 kgf.cm	Mnf =	1252175 kgf.cm
$\phi \times Mn$ =	2206678 kgf.cm	Mu =	1785920 kgf.cm
2206678 kgf.cm	>	1785920 kgf.cm	OK!

Fonte: O autor

4.1.8 Verificação das tensões de serviço na armadura de aço e no CFRP

Por fim o programa verifica se a tensões do aço e do CFRP submetidas a cargas de serviços atende ao determinado pela norma. Detalhe em Figura 36.

FIGURA 36 – Exemplo de em que a verificação das tensões atende aos requisitos.

VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES DE SERVIÇO NA ARMADURA DE AÇO E NO FRP			
fss =	3057 kgf/cm ²	<	4000 kgf/cm ² OK!
ffs =	2158,718 kgf/cm ²	<	18810 kgf/cm ² OK!

Fonte: O autor

4.2 Aplicação

Foi inserido na entrada de dados as informações referentes ao exemplo de cálculo proposto por Machado e Machado, aqui já apresentado, Figura 37.

FIGURA 37 – Dados do exemplo de cálculo – primeira tentativa.

GEOMETRIA DA PEÇA (CM)	
h =	60
d =	55
d' =	4
b =	30
L =	750

PROPRIEDADES MECANICA (MPA)	
fck =	27
fyk =	500

PROPRIEDADES CARACTERÍSTICA DA FIBRA	
f* fu =	3800
ε* fu =	0.017
tf =	0.33
bf =	270
n =	2
Ef =	228000
c/d =	0.25
αε =	0.95

CARREGAMENTO (N/CM)	
p =	125
g =	45

ÁREA DE ARMADURA (CM²)	
As	6.25
A's	1.6

MOMENTO RESISTENTE DA VIGA (KN.M)	
M _{res.}	9492

Fonte: O autor

Assim como apresentado no exemplo de cálculo, o programa também identificou que a viga necessita de reforço, Figura 38.

FIGURA 38 – Confirmação quanto a necessidade de reforço – primeira tentativa.

VERIFICAÇÃO SE NECESSITA DE REFORÇO			
Mg =	3164 KN.cm	Mp =	8789 KN.cm
Mg + Mp =	11953.00 KN.cm	Mres. =	9492 KN.cm
RESULTADO = NECESSITA DE REFORÇO			

Fonte: O autor

Os dados de cálculo também apresentaram quase em sua totalidade valores idênticos aos calculados por Machado e Machado, podendo avaliar pequenas diferenças decorrentes a arredondamento necessário para realizar os cálculos. Detalhes na Figura 39.

FIGURA 39 – Dados de cálculo – primeira tentativa.

DADOS DE CÁLCULO			
$f_c = 1639 \text{ N/cm}^2$	$f_s = 12983 \text{ N/cm}^2$	$E_f = 223529 \text{ Mpa}$	$\epsilon'_s = 0.0013$
$K = 0.030$	$\epsilon_s = 0.0006$	$E_f = 228000 \text{ Mpa}$	$\epsilon'_c = 0.0019$
$K' = 0.030$	$\epsilon_{bi} = 0.0007$	$c = 137.50 \text{ mm}$	$\beta_1 = 0.7436$
$c = 1.031 \text{ cm}$	$\beta_1 = 0.857$	$A_f = 178.2 \text{ mm}^2$	$\alpha_1 = 0.8717$
$z = 54.587 \text{ cm}$	$E_c = 24422$	$f_e = 1254 \text{ N/mm}^2$	$\epsilon_c = 0.00180$
$F_{s,c} = 81147 \text{ N}$	$A_s = 62.5 \text{ mm}^2$		$\epsilon_s = 0.0055$
$ps.E_s/E_c = 0.03$	$As.E_s.(d-kd/3).(d-kd) = 2.94E+10$		
$pf.E_f/E_c = 0.009$	$Af.E_f.(df-kd/3).(df-kd) = 1.11E+10$		
$df/d = 1.091$	$Ms = 1195313 \text{ kgf.cm}$		
$k = 0.205$			
$kd = 11.29296 \text{ cm}$			
$\epsilon_{bi}.Af.E_f.(df-kd/3) = 154350$			
$(d-kd)*E_s = 91784781$			

Fonte: O autor

As verificações para o equilíbrio das forças também convergem com os valores calculados no exemplo proposto por Machado e Machado, podendo sofrer pequenas variações devido a arredondamentos. Detalhamento em Figura 40.

FIGURA 40 – Verificações para o equilíbrio das forças – primeira tentativa.

VERIFICAÇÕES PARA O EQUILÍBRIO DO SISTEMA DE FORÇAS			
VALOR ARBITRADO PARA LINHA NEUTRA: 137.50 mm			
$\epsilon_{fd} = 0.0055$	0.0055	<	0.0145 OK!
$\epsilon_{fe} = 0.0094$	0.0094	>	0.0055 NÃO OK!
DESTA FORMA	$\epsilon_{fe} = 0.0055$		
$f_s = 1155 \text{ N/mm}^2$	1155 N/mm ²	>	435 N/mm ² NÃO OK!
DESTA FORMA	$f_s = 435 \text{ N/mm}^2$		
$f'_s = 273 \text{ N/mm}^2$	273 N/mm ²	<	435 N/mm ² OK!
DESTA FORMA	$f'_s = 273 \text{ N/mm}^2$		

Fonte: O autor

Igualmente a aplicação de cálculo os valores da linha neutra não convergem para a razão $\frac{c}{d} = 0,25$, Figura 41.

FIGURA 41 – Equilíbrio das forças – primeira tentativa.

EQUILÍBRIO DO SISTEMA DE FORÇAS			
VALOR DE CALCULO DA LINHA NEUTRA:	9.43 cm		
c cal. =	9.43 cm	≠	c arb. = 13.75 cm NÃO CONVERGIU!

OBS: Se não atender a condição de equilíbrio do sistema de forças resultando em valores diferentes para a profundidade da linha neutra c, adotar novo valor para a razão c/d

Fonte: O autor

Atendendo a observação do programa foi feita uma nova tentativa alterando o valor da razão $\frac{c}{d}$. Na segunda tentativa utilizando $\frac{c}{d} = 0,20$, assim como no exemplo de cálculo, Figura 42.

FIGURA 42 – Dados do exemplo de cálculo – segunda tentativa.

GEOMETRIA DA PEÇA (CM)	
h =	60
d =	55
d' =	4
b =	30
L =	750

PROPRIEDADES MECÂNICA (MPA)	
fck =	27
fyk =	500

PROPRIEDADES CARACTERISTICA DA FIBRA	
f* fu	3800
ε* fu =	0.017
tf =	0.33
bf =	270
n =	2
Ef =	228000
c/d =	0.2
Cε =	0.95

CARREGAMENTO (N/CM)	
p =	125
g =	45

ÁREA DE ARMADURA (CM ²)	
As	6.25
A'S	1.6

MOMENTO RESISTENTE DA VIGA (KN.M)	
M _{res.}	9492

Fonte: O autor

A viga continua necessitando de reforço, pois a alteração realizada não tem qualquer influência para essa análise, Figura 43.

FIGURA 43 – Dados do exemplo de cálculo – segunda tentativa.

VERIFICAÇÃO SE NECESSITA DE REFORÇO			
Mg = 3164 KN.cm	Mp = 8789 KN.cm	Mg + Mp = 11953.00 KN.cm	Mres. = 9492 KN.cm
RESULTADO = NECESSITA DE REFORÇO			

Fonte: O autor

Assim como na primeira tentativa os dados de cálculo também apresentaram quase em sua totalidade valores idênticos aos calculados por Machado, Figura 44.

FIGURA 44 – Dados de cálculo – segunda tentativa.

DADOS DE CÁLCULO			
f'c = 1639 N/CM ²	fs = 12983 N/cm ²	Ef = 223529 Mpa	ε's = 0.0009
K = 0.030	εs = 0.0006	Ef = 228000 Mpa	ε'c = 0.0019
K' = 0.030	εbi = 0.0007	c = 110.00 mm	β1 = 0.7209
c = 1.031 cm	β1 = 0.857	Af = 178.2 mm ²	α1 = 0.7711
z = 54.587 cm	Ec = 24422	fe = 1254 N/mm ²	εc = 0.00140
F s,c = 81147 N	As = 62.5 mm ²		εs = 0.0055
ps.Es/Ec = 0.03	As.Es.(d-kd/3).(d-kd) = 2.94E+10		
pf.Ef/Ec = 0.009	Af.Ef.(df-kd/3).(df-kd) = 1.11E+10		
df/d = 1.091	Ms = 1195313 kgf.cm		
k = 0.205			
kd = 11.29296 cm			
εbi.Af.Ef.(df-kd/3) = 154350			
(d-kd)*Es = 91784781			

Fonte: O autor

As verificações para o equilíbrio das forças continuam convergindo com os valores calculados no exemplo proposto por Machado e Machado, conforme Figura 45, sofrendo pequenas variações devido a arredondamentos.

FIGURA 45 – verificações para o equilíbrio das forças – segunda tentativa.

VERIFICAÇÕES PARA O EQUILÍBRIO DO SISTEMA DE FORÇAS			
VALOR ARBITRADO PARA LINHA NEUTRA: 110.00 mm			
ϵ_{fd} =	0.0055	0.0055 <	0.0145 OK!
ϵ_{fe} =	0.0127	0.0127 >	0.0055 NÃO OK!
DESTA FORMA	ϵ_{fe} =	0.0055	
f_s =	1155 N/mm ²	1155 N/mm ² >	435 N/mm ² NÃO OK!
DESTA FORMA	f_s =	435 N/mm ²	
f'_s =	185 N/mm ²	185 N/mm ² <	435 N/mm ² OK!
DESTA FORMA	f'_s =	185 N/mm ²	

Fonte: O autor

Agora, como pode ser visualizado na Figura 46, a linha neutra de cálculo e a linha neutra arbitrada resultam no mesmo valor. Assim podendo passar para os passos seguintes de análises e verificações.

FIGURA 46 – Equilíbrio das forças – segunda tentativa.

EQUILÍBRIO DO SISTEMA DE FORÇAS			
VALOR DE CÁLCULO DA LINHA NEUTRA: 11.00 cm			
c cal. =	11.00 cm	=	c arb. = 11.00 cm CONVERGIU!
OBS: Se não atender a condição de equilíbrio do sistema de forças resultando em valores diferentes para a profundidade da linha neutra c, adotar novo valor para a razão c/d			

Fonte: O autor

Concluindo as análises o programa mostrou que a contribuição do aço atende aos requisitos da norma, conforme Figura 47. E tensões de serviço na armadura de aço e no CFRP também atendem aos parâmetros da norma, Figura 48.

FIGURA 47 – Contribuição do aço para flexão – segunda tentativa.

CONTRIBUIÇÃO DO AÇO PARA FLEXÃO			
Mns =	1387515 kgf.cm	Mnf =	1252175 kgf.cm
$\phi \times Mn$ =	2206678 kgf.cm	Mu =	1785920 kgf.cm
2206678 kgf.cm	>	1785920 kgf.cm	OK!

Fonte: O autor

FIGURA 48 – Verificação das tensões – segunda tentativa.

VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES DE SERVIÇO NA ARMADURA DE AÇO E NO FRP			
fss =	3057 kgf/cm ²	<	4000 kgf/cm ² OK!
ffs =	2158.718 kgf/cm ²	<	18810 kgf/cm ² OK!

Fonte: O autor

5 DISCUSSÃO

A pesquisa bibliográfica se mostra realmente necessária para o estudo do reforço de vigas de concreto com a utilização de sistemas compósitos de fibras de carbono. A mesma contribuiu para o entendimento de que esse sistema, mesmo não popularizado no país, apresenta excelentes resultados quanto a recuperação da capacidade portante das vigas.

Com base na análise dos dados apresentados pode se concluir que a pesquisa bibliográfica proporcionou bom entendimento a respeito da realização do dimensionamento ao reforço. Possibilitando o desenvolvimento de uma rotina de cálculo com o uso de planilhas eletrônicas do *Excel*.

O programa de cálculo desenvolvido mostrou-se eficiente, pois o mesmo apresenta resultados coerentes quando comparados ao exemplo de validação proposto por Machado e Machado. Tornando-se também eficiente quanto a questão que foi proposta, pois o uso do programa evita que o projetista tenha que realizar uma repetição da resolução das equações, o que tornaria o modo de dimensionamento extremamente exaustivo, visto que poderá ser feitas inúmeras repetições até que alcance um resultado coerente e satisfatório.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi proposto, estudaram-se as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de fibra de carbono e a sua aplicação para fins de reforço estrutural na construção civil. O estudo foi baseado em uma pesquisa bibliográfica, que possibilitou estudar os métodos de reforço de vigas de concreto armado identificando as vantagens do uso do sistema CFRP. A pesquisa teve também o objetivo de coletar dados a respeito do dimensionamento do reforço com utilização dos sistemas compostos e estruturados com fibras de carbono.

O reforço estrutural com fibras de carbono demonstrou ser uma técnica promissora, por apresentar boas vantagens em comparação a outros métodos de reforço.

Contudo, durante a pesquisa foi possível identificar que esse material e técnica de reforço ainda é pouco estudado, e possui pouco material bibliográfico disponível e nenhuma norma nacional que regulamente sua utilização. O que dificulta sua popularização, mesmo se tratando de uma alternativa muito boa para ser aplicada a área da construção civil brasileira.

Devido à ausência de normatização brasileira que regulamente o dimensionamento de reforço com a utilização deste material, essa pesquisa visa disseminar informações a respeito do mesmo, trazendo também esclarecimentos quanto ao conteúdo da norma internacional disponível.

A pesquisa bibliográfica proporcionou o entendimento de como funciona o dimensionamento do reforço, possibilitando a criação de um programa com o software Excel, com a finalidade de agilizar o processo de dimensionamento do reforço. Uma vez que durante o processo o projetista deverá arbitrar e testar valores, afim de chegar em um resultado satisfatório, esse programa apresentou, comprovadamente, bons resultados nessa etapa de iteração.

Como sugestão para trabalhos futuros, é importante realizar um aprofundamento nas técnicas do reforço assim como sua aplicação para combater outros tipos de esforços sofridos pelas peças de concreto. Com isso poderá ser criados programas de cálculo que facilite o processo de dimensionamento para esforços além do de flexão.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. Projetos de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 440.2R-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Farmington Hills, Michigan, 2017.

ARAÚJO, Thiago. Reforço estrutural de estruturas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono. [S. l.: s. n.], 2020.

BEBER, Andriei José. Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono. 2003. Tese (Doutor em engenharia) - Universidade federal do rio grande do sul, [S. l.], 2003.

MACHADO, Ari, P. Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono - Viapol. São Paulo, [2010?].

MACHADO, Ari de Paula; MACHADO, Bruno Alberto. Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compostos FRP: Teoria e Prática. 1. ed. São Paulo: PINI, 2015. 517 p.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. 1 ed. São Paulo: PINI, 1998. 257 p.