UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - DEC
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

GLADSTON DE OLIVEIRA FREITAS

REFORÇO ESTRUTURAL À FLEXÃO COM FIBRA DE CARBONO EM VIGA DE CONCRETO ARMADO

SÃO CRISTÓVÃO
2023

GLADSTON DE OLIVEIRA FREITAS

REFORÇO ESTRUTURAL À FLEXÃO COM FIBRA DE CARBONO EM VIGA DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Sergipe – UFS, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação de Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Emerson Figueredo dos Santos.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ATA DE DEFESA

Gladston de Oliveira Freitas

Reforço Estrutural à Flexão com Fibra de Carbono em Viga de Concreto Armado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para o título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: **24 de maio de 2023**

Banca Examinadora		**Nota**
Orientador(a): Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos (UFS)	–	8,0
Examinador(a): Profa. Me. Sandra Carla Lima Cardoso (UFS)	–	7,0
Examinador(a): Prof. Me. Diego Faro Alves (UFS)	–	6,0
	Média Final:	**7,0**

gov.br Documento assinado digitalmente
EMERSON FIGUEIREDO DOS SANTOS
Data: 06/06/2023 10:34:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos (UFS)
Assinatura do(a) Orientadora(a)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por sempre ter me dado forças para nunca desistir perante todas as dificuldades.

Aos meus pais Claudineide e Graciano por sempre acreditarem em mim.

A minha companheira e amiga Bruna, por sempre estar ao meu lado e me apoiar.

A minha irmã Glaziely por sempre ter cuidado de mim, minha segunda mãe.

Ao meu irmão Graciano Júnior.

Em memória dos meus avós paternos e maternos Gonçalo e Dona Socorro, Maria Cícera e José Maria.

Ao meu Tio Gustavo que me ajudou no início da minha vida estudantil.

Ao senhor Adelson e sua esposa Dona Celma.

Aos amigos que a vida me apresentou, Dr. Carlos e sua esposa Dra. Patrícia.

A todos meus amigos da Universidade Federal de Sergipe, em especial Abraao, Thyago, Rosane, Fernando e Francisco.

Ao pessoal do meu estágio, em especial Ogenivaldo, Paulo, Agenor e Renilton, com quem tive a oportunidade de aprender.

A Prof. Sandra pela oportunidade que me deu de enriquecer este trabalho.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Emerson Figueredo dos Santos por ter me aceitado como orientando. Obrigado pela dedicação e disponibilidade.

RESUMO

A aplicação da fibra de carbono apesar de ser um método de reforço estrutural já conhecido, vem ganhando destaque e se tornando cada vez mais presente em solução de reforços estruturais. Para o dimensionamento é preciso usar uma norma Americana ACI 440-2017. Neste presente trabalho de conclusão de curso, será demostrado todos os passos para dimensionar um reforço estrutural à flexão em uma viga de concreto armado usando fibra de carbono e posteriormente compará-lo com um método de reforço estrutural convencional. Para isso, utiliza-se uma viga de concreto armado pré-dimensionada, na qual amplifica-se o momento de projeto visando necessitar de reforço. Os resultados apresentam um aumento da resistência à flexão com o uso da fibra de carbono, sem intervenção na viga reforçada.

Palavra-chave: Concreto armado. Reforço. Fibra de carbono.

ABSTRACT

The application of carbon fiber, despite being an already known structural reinforcement method, has been gaining prominence and becoming increasingly present in resistant reinforcement solutions. For dimensioning, use an American standard ACI 440-2017. In this present course completion work, all steps will be demonstrated to design a structural reinforcement to bending in a reinforced concrete beam using carbon fiber and later compare it with a conventional structural reinforcement method. For this, a pre-dimensioned reinforced concrete beam is used, in which the design moment is amplified, aiming at the need for reinforcement. The results show an increase in flexural strength with the use of carbon fiber, without intervention in force.

Keyword: Reinforced Concrete. Reinforcement. Carbon Fiber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Adição de Chapas e Perfis Metálicos

Figura 02: Reforço com Chapa Metálica

Figura 03: Fibras de Carbono

Figura 04: Preparação da Resina

Figura 05: Aplicação da Resina

Figura 06: Aplicação da Fibra de Carbono em Viga

Figura 07: Aplicação de Fibra de Carbono em Pilar

Figura 08: Armazenamento da Fibra de Carbono

Figura 09: Aplicação da Fibra de Carbono por Profissionais Qualificados

Figura 10: Diagrama Tensão Deformação de uma Viga

Figura 11: Resultante das Forças que Atuam na Peça com a Fibra de Carbono

Figura 12: Dimensões da Viga

Figura 13: Reforço da Armadura Longitudinal

Figura 14: Armadura Longitudinal Implantada

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Fator de Resistência

Sumário

1 INTRODUÇÃO **9**
1.1 Objetivos **11**
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **12**
2.1 Técnicas mais usuais no reforço estrutural 12
2.1.1 Adição de chapas e perfis metálicos **12**
2.2 Reforço estrutural com fibra de carbono **14**
2.3 Desvantagens da fibra de carbono **19**
2.4 Vantagens da fibra de carbono **21**
3 DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE AÇO DE UMA VIGA EM CONCRETO ARMADO **23**
3.1 Dimensionamento de armadura de vigas à flexão **23**
3.2 Dimensionamento de armadura longitudinal para concretos até 50 MPa **23**
4 DIMENSIONAMENTO DA FIBRA DE CARBONO PARA REFORÇO ESTRUTURAL **26**
4.1 Equacionamento da fibra de carbono **26**
5 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO EM UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO **32**
5.1 Método convencional com reforço de barra de aço. **32**
5.2 Exemplo de Cálculo para Reforço com Fibra de Carbono **35**
6 CONCLUSÃO **39**

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da tecnologia e desenvolvimento da ciência dos materiais, novas alternativas de reforço estrutural vêm ganhando destaque, dentre elas a fibra de carbono. Entretanto, apesar de ser um material já conhecido no segmento industrial e naval, segundo SOUZA E RIPPER (1998), foi ganhando espaço na construção civil em meados do século XX.

Assim como a tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) que surgiu no século passado, mas vem ganhando notoriedade, atualmente nas empresas privadas, órgãos públicos e universidades, a aplicação do compósito reforçado com fibra de carbono, não foi diferente. Ou seja, vem ganhando espaços na solução de reforço estrutural no século presente, apesar de ser uma técnica já conhecida.

Logo, por ser uma alternativa ao combate à flexão, que antes era utilizado apenas o aço em vigas de concreto armado, a chapa de fibra de carbono vem sendo mais solicitada. Isso porque, é mais resistente que o aço, chegando a ter sete vezes sua resistência, além de ter uma massa específica muito menor, isto é, praticamente o seu peso é desprezível (SILVA, 2009).

Outro ponto que chama a atenção no reforço de fibra de carbono, aplicadas em vigas de concreto armado, é sua facilidade de aplicação. Com um dimensionamento eficiente, uma resina epóxi de qualidade e mão de obra experiente, consegue-se ter uma aplicação da chapa de carbono no elemento estrutural com eficiência (MACHADO, 2006).

Contudo, para ter um bom reforço, além da mão de obra qualificada na aplicação e materiais apropriados, necessita-se de um engenheiro com experiência em reforço estrutural com fibra de carbono para fazer seu dimensionamento. Isso porque, para dimensionar a chapa é preciso usar a norma americana ACI 440-2017, o que demanda mais qualificação profissional, sem falar na economia do material. Pois, a chapa de carbono, por ser um produto importado, ainda é um material caro. Logo, o mau dimensionamento pode ter um aumento de preço significativo na hora de projetar (MACHADO, 2006).

Ao se tratar de esforços solicitantes, de acordo com SOUZA E RIPPER (1998), até quando o concreto deixa a fase elástica para a plástica, as estruturas com fibra de carbono aplicadas, mantém o comportamento elástico em suas deformações. Logo, para critério de dimensionamento para a área aplicada pode ser feito em serviço, conforme outras técnicas de reforço estrutural, por exemplo, colagem de chapas metálicas. (SOUZA E RIPPER, 1998).

A fibra de carbono para reforço estrutural não tem apenas o objetivo de reforço no sentido de reforma, como também aumenta a resistência do elemento caso ele tenha alguma limitação construtiva. Logo, uma viga ou pilar que não possam ter suas dimensões geométricas alteradas pode-se aumentar sua resistência colocando mais área de aço ou aplicando o compósito, a exemplo da fibra de carbono. Além disso, se for uma obra restrita, como é o caso de hospitais com salas com ressonância magnética, o reforço com aço não é permitido, sendo aconselhável o compósito de carbono (SOUZA E RIPPER, 1998).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal do trabalho é apresentar o dimensionamento à flexão de um reforço estrutural com fibra de carbono em uma viga de concreto armado.

1.1.2 Objetivo específico

O objetivo específico é descrever o passo-a-passo do dimensionamento usando a norma americana ACI 440 -2017.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As manifestações patológicas estruturais podem acontecer por diversos casos, por exemplo, envelhecimento natural, economia dos materiais, falta de resistência ou até mesmo por má concepção estrutural além disso, os serviços de reparo ou reforço estrutural requerem uma prévia memória de cálculo para diagnosticar alguma mudança na carga da estrutura. (SOUZA E RIPPER, 1998)

2.1 Técnicas mais usuais no reforço estrutural

O tipo de reforço a ser adotado em uma peça de concreto armado é um dos momentos mais delicados. Portanto, é necessário de um profissional habilitado para a escolha da técnica que será aplicada e que se responsabilize pelas consequências futuras. (MACHADO, 2006)

Por isso, a solução do projetista tem de ser a mais segura e econômica, sem comprometer a integridade da estrutura. A qualidade dos materiais que serão usados também são peças chaves na hora de escolher o tipo de reforço. Em seguida, algumas técnicas de reforço estrutural serão detalhadas. (SOUZA E RIPPER, 1998).

2.1.1 Adição de chapas e perfis metálicos

Quando a estrutura precisa de um reforço rápido, eficiente e que não possa modificar a geometria da estrutura, a adição de chapas e perfis metálicos configura uma boa solução, como pode se ver na Figura 1. (SOUZA E RIPPER, 1998)

Esse tipo de reforço é aplicado como forma de complementar a área de aço necessária para aumentar a resistência do elemento estrutural à flexão. De aplicação externa, sua fixação pode ser feita por meio de adesivo epóxi e/ou por chumbadores de ancoragem química ou mecânica.

Figura 01: Adição de Chapas e Perfis Metálicos

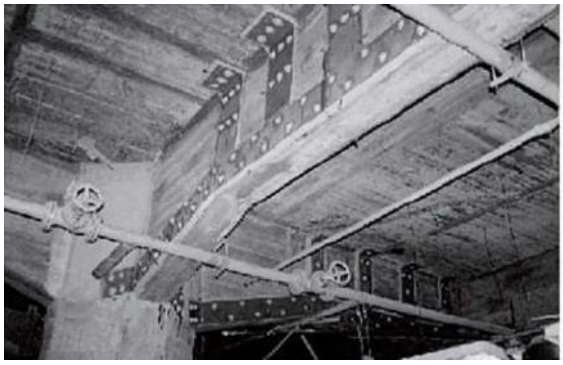
Fonte: SOUZA E RIPPER, 1998

A limpeza do substrato, é condição indispensável, para aderência do material. A rugosidade da superfície é outro ponto crucial, pois caso seja muito lisa, não terá aderência suficiente com o concreto, do contrário, caso a rugosidade seja em excesso, as placas sofrerão desconformidade. Portanto, a rugosidade ideal é aquela que seja a mais equilibrada possível sem exageros para melhor aderência entre os elementos estruturais. A aplicação da chapa metálica e perfis metálicos são praticamente iguais, a diferença é que os perfis metálicos utilizam chumbadores para sua fixação. (HELENE, 1992).

O lado negativo de um reforço desse tipo são as altas temperaturas, pois pode afetar drasticamente o comportamento do aço. Em caso de sinistro como incêndio, por exemplo, a resistência do aço ou sua geometria pode se modificar, diminuindo sua capacidade de carga. (HELENE, 1992).

Conforme a Figura 02, o reforço estrutural requer a presença de cálculo para dimensionamento, logo precisa de mão de obra especializada, tanto do projetista como na execução da implantação das chapas ou perfis metálicos.

Figura 02: Reforço com Chapa Metálica



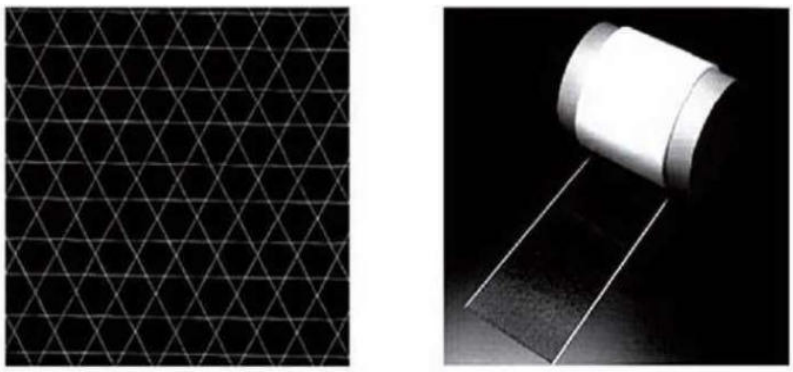
Fonte: SOUZA E RIPPER, 1998

2.2 Reforço estrutural com fibra de carbono

O reforço com fibra de carbono vem como alternativa no sentido de reforço a flexão. Principalmente em hospitais onde há ressonância magnética que restringem o uso do aço. Por isso, a fibra de carbono é muito utilizada nesse tipo de aplicação. (SOUZA E RIPPER, 1998)

A aplicação da folha de carbono aumenta a resistência no elemento estrutural, além de simples instalação, ou seja, sua aplicação conta com o auxílio de uma resina epóxi de colagem conforme a Figura 03 (MACHADO, 2006).

Figura 03: Fibras de Carbono



FONTE: SOUZA E RIPPER, 1998

A resina epóxi que garante a aderência da fibra de carbono com o substrato (camada apassivadora) da viga de concreto armado. Logo, a quantidade de resina epóxi tem de ser o suficiente para mante a fibra “colada” na viga de concreto armado, não podendo ser aplicada em excesso ou em pouca quantidade. Por isso, antes de aplicar o compósito existe a preparação da resina e da camada apassivadora, a Figura 04 ilustra o procedimento do preparo da resina epóxi. (MACHADO, 2006).

Figura 04: Preparação da Resina

Fonte: AUTOR 2023

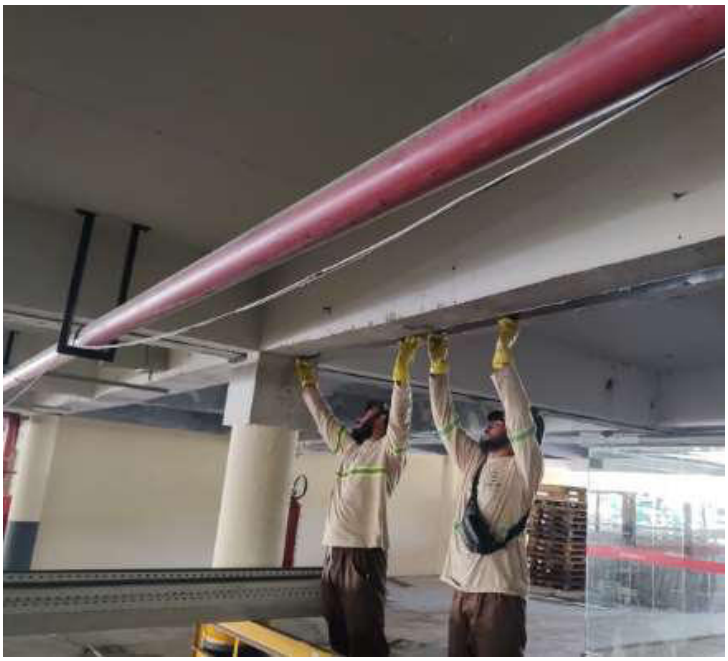
A Figura 05 exemplifica como deve ser aplicada a resina epóxi, logo, 1 lado de toda sua superfície deve ser preenchido para manter fixa a viga de concreto armado e a placa de carbono. Mas, sua aplicação tem de ser feita *in loco* porque sua reação é muito rápida, caso isso não aconteça pode danificar o material.

Figura 05: Aplicação da Resina Epóxi

Fonte: AUTOR 2023

A aplicação é simples, conforme a figura 06, apenas com 2 profissionais pode instalar a fibra com espessura de 1,5 mm de espessura. Isso porque, o peso da chapa de carbono é praticamente desprezível o que facilita seu manuseio na obra.

Figura 06: Aplicação da Fibra de Carbono em Viga



Fonte: AUTOR 2023

A Figura 7 mostra o passo-a-passo de como deve ser o procedimento em um pilar. Por isso, é preciso lixar a estrutura, para dar mais aderência, aplicar o produto primário, posteriormente, a resina de colagem e depois aplicação da folha de carbono conforme a parte 4 da Figura 7, no final do procedimento é aplicada uma resina de revestimento (SOUZA E RIPPER, 1998).

Figura 7: Aplicação de Fibra de Carbono em Pilar

Fonte: SOUZA E RIPPER, 1998

Em relação ao aço, a fibra de carbono tem 7 vezes sua resistência a tração, além disso não é preciso de intervenção por meio de remoção parcial de material da peça para sua aderência. No reforço da fibra de carbono, o material é colado utilizando a resina epóxi que é bastante resistente às solicitações que são aplicadas e de cura rápida. (SILVA, 2009).

Para o dimensionamento da fibra de carbono, *a priori, é mister* entender o funcionamento do compósito. Logo, por se tratar de reforço estrutural, ao ser instalado no elemento de concreto armado, a resistência a flexão aumenta sem precisar modificar a área de aço ou sua geometria, o que facilita seu uso em obras mais antigas como reservatórios, casas, empreendimentos e igrejas além disso pode manter a forma original. (MACHADO, 2006).

Portanto, reforços com fibra de carbono vem ganhando muito espaço na construção civil, pois além de ser uma opção dentre várias técnicas que existem, pode ser utilizada para manter as características arquitetônicas. Ou seja, na prática de retirar elementos estruturais como pilares para ocupar maiores vãos ou mudança na utilização do empreendimento pode ser solucionado com a simples aplicação de chapa de fibra de

carbono, para garantir a qualidade e resistência sem fazer grandes modificações na estrutura caso seja aplicada outra técnica de reforço estrutural. (SOUZA E RIPPER, 1998)

A fibra de carbono pode ser utilizada em uma situação mista, isto é, além do compósito de fibra de carbono, a utilização de outra técnica em conjunta também é admitida. Por exemplo, no reforço de um tabuleiro de uma ponte, parte do reforço pode ser aplicado com fibra de carbono e o restante pode ser feita em chapa de aço. Mas, para isso, é preciso ver as solicitações da estrutura porque, conforme já mencionado, a chapa de carbono é aplicada na parte que o elemento é tracionado.

2.3 **Desvantagens da fibra de carbono**

Em relação as desvantagens da fibra de carbono, alguns pontos devem ser destacados, como: compra do material, cuidados na instalação da fibra, custo da fibra, mão de obra e metodologia de cálculo.

A compra do insumo e escolha do fornecedor é um processo que demanda tempo, caso o projetista não tenha um fornecedor comprometido, pois a busca de um material que garanta as expectativas desejadas é indispensável. No entanto, por ser um produto que está em alta, a procura é bastante solicitada. Portanto, atrasos na entrega podem acontecer com frequência. Outro ponto importante na aquisição do insumo, é que sua produção é feita no exterior, demandando mais tempo. Logo, uma empresa que deseja trabalhar com reforço de fibra de carbono tem de ter um bom planejamento para não acontecer entraves em virtude da falta do material.

A aplicação da fibra de carbono precisa ter alguns cuidados, isso porque o local não pode ter interferências, como tubulações que passem próximos ao local da aplicação da fibra de carbono. Outro ponto que demanda atenção e que demanda tempo, é a preparação do substrato, isso porque, não pode ter ondulações excessivas na superfície para evitar desplacamento da chapa de carbono, logo, para evitar isso os equipamentos tem de ser apropriados.

No momento da aplicação deve-se ter cuidado com a resina, pois ela tem um poder de reação muito rápido, por isso a fibra de carbono tem de ser preparada junto com

a resina epóxi no local, a fim de evitar desperdício de material. Outro ponto indispensável, é a limpeza dos equipamentos, por conta da rápida reação da resina, causando prejuízos por conta do descuido com o material. Logo, a fibra de carbono, no momento da aplicação os profissionais precisam ter cautela para não trazerem danos na execução do reforço estrutural.

O custo do material é sempre um momento que exige cautela, principalmente na hora de fazer o levantamento, muitas vezes, o preço com reforço com fibra de carbono pode chegar a 80% do custo total do serviço. Por isso, que o aproveitamento do material tem de ser o máximo possível. Sem falar que um corte errado ou perfurações indesejadas na fibra de carbono poder tem consequências negativas ao lucro do serviço. A Figura 08 ilustra o armazenamento da fibra de carbono.

Figura 08: Armazenamento da Fibra de Carbono

Fonte: AUTOR 2023

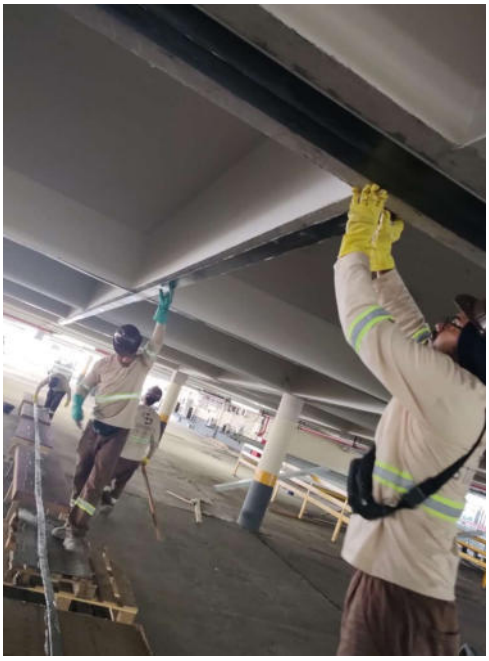
Por isso, seu armazenamento tem de ser em um local seguro para que não coloque em risco sua qualidade.

A escolha da mão de obra é outro processo que demanda bastante atenção, porque tem de ser especializada, no Brasil a busca desse profissional é bastante procurada. No entanto, o reforço de estrutura com fibra de carbono por ser uma técnica muito

desconhecida por muitos profissionais, torna-se difícil seu treinamento.

O treinamento da equipe é de suma importância, além de agilizar e dar qualidade ao processo, o material tem de ser inserido em quantidade certa, conforme especificada pelo projetista. Portanto, caso exista sobra de resina epóxi ou fibra de carbono quer dizer que em alguma parte do reforço está em excesso e outra com falta. A Figura 09, mostra uma equipe qualificada trabalhando, na instalação de um reforço.

Figura 09: Aplicação da Fibra de Carbono por Profissionais Qualificados



Fonte: AUTOR 2023

2.4 Vantagens da fibra de carbono

A fibra de carbono é um compósito bastante resistente a esforços de tração, ou seja, aumenta a resistência da peça estrutural e praticamente não acrescenta peso à estrutura. Seu transporte em obra pode ser conduzido por apenas 1 colaborador, o que dá economia de mão de obra (MACHADO, 2006).

Pode-se adequar ao projeto com muita maestria, além de aumentar a resistência do elemento estrutural sem modifica sua geometria. Por isso, é bastante eficiente em obras com seções menores e com um nível de esbeltez maior. Em relação ao escoramento, também é muito econômica, porque comparada com os outros métodos que precisa de um número muito grande de escoras (SOUZA E RIPPER, 1998).

Em relação ao custo, por ser um material novo para muitos profissionais e demora na aquisição, segundo algumas empresas da área, ainda tem um preço bastante elevado. No entanto, a rapidez e praticidade podem justificar o investimento. Isso porque, a aplicação de um reforço com métodos convencionais pode levar um pouco mais de tempo, enquanto aplicando reforço com fibra de carbono, em virtude de sua praticidade pode durar algumas semanas.

Por fim, sua aplicação é muito prática e rápida, através de uma resina epóxi, usada para dar aderência ao substrato, o material é aplicado na fibra e imediatamente colada na viga de concreto na parte tracionada do elemento estrutural de concreto armado. Segundo a equipe especializada todo o material é devidamente quantificado. Ou seja, não pode haver excesso e muito menos sobras de material.

3 DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE AÇO DE UMA VIGA EM CONCRETO ARMADO

Este capítulo destina-se ao conhecimento do processo de dimensionamento de fibra de carbono como reforço à flexão de vigas de concreto armado. Antes, porém, será apresentado, de forma breve, o critério de dimensionamento de uma viga de concreto armado conforme a NBR 6118 2014.

3.1 Dimensionamento de armadura de vigas à flexão

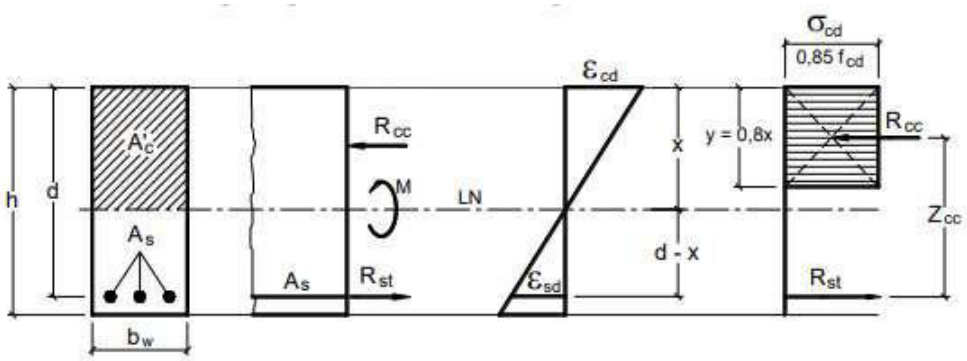
Neste tópico a principal importância é o dimensionamento da estrutura que resiste ao momento fletor. O dimensionamento é feito no estado limite último (ELU) tanto do concreto como do aço. Salientando, que os concretos de resistência de CA50 até CA 90 o dimensionamento é feito de forma diferente, levando em consideração alguns critérios de comportamento do concreto (CARVALHO, 2014).

3.2 Dimensionamento de armadura longitudinal para concretos até 50 MPa

Para critério de dimensionamento, conforme o diagrama do comportamento do concreto é trabalhado no Estádio 3, ou seja, onde não se leva em consideração a tração do aço como resistência. Portanto, para dimensionamento do concreto é levado em consideração uma série de procedimentos para que a hipótese de cálculo forneça economia de material e sobretudo segurança (ARAUJO, 2014).

A figura a baixo, mostra o comportamento das tensões de resistência do concreto e do aço, isto é, sua interação. Para garantir a aderência entre ambos, é preciso entender seu comportamento quando submetido a um esforço devido ao carregamento.

Figura 10: Diagrama Tensão Deformação de uma Viga



FONTE: BASTOS (2020)

$$F_c = (0{,}85.f_{cd}).b_w.(0{,}8.x) \quad (4.1)$$

$$z = d - 0{,}4.x \quad (4.2)$$

$$M_d = F_c.z = (0{,}68.x.d. - 0{,}272d.x^2)b_w.f_{cd} \quad (4.3)$$

$$A_s = \frac{M_d}{z.f_{yd}} \quad (4.4)$$

Onde,

F_c = Força de resistência do concreto a compressão.

f_{cd} = Tensão de resistência do concreto do concreto.

b_w = Espessura da peça de concreto armado.

x = Altura da linha neutra.

M_d = Momento fletor de cálculo, majorado.

z = Distância do braço do binário de forças resultantes do aço e concreto.

A_s = Área de aço.

Com a área de aço, é possível chegar ao equilíbrio das forças que são dimensionadas. Logo, para garantir que a estrutura tenha mais resistência aos esforços solicitados, as cargas que atuam na peça, são majoradas conforme o tipo de atuação que submetida, consoante a NBR 6120 que trata sobre tais esforços. (ARAUJO, 2014)

Conforme foi dito anteriormente, o concreto que tem resistência menor ou igual a 50 MPa, consoante NBR 6118, tem de garantir uma relação de x/d = 0,45 para manter a segurança do sistema e ductibilidade. Dito isso, pode-se chegar à altura útil que a peça pode ter, usando a equação logo abaixo (CARVALHO, 2014)

$$d = 2.\sqrt{\frac{M_d}{b_w.f_{cd}}} \qquad (4.5)$$

4 DIMENSIONAMENTO DA FIBRA DE CARBONO PARA REFORÇO ESTRUTURAL

Para o dimensionamento do compósito de carbono, por não ter uma norma brasileira para isso, é preciso usar a norma americana. Portanto, trata-se de um dimensionamento especifico, entre a interação do comportamento do concreto, aço e compósito de fibra de carbono.

A norma utilizada será a ACI 440-2017, que fala especificamente do dimensionamento da fibra de carbono. A princípio o método de cálculo é interativo, o que dificulta o cálculo por sempre ser dinâmico. Tal método será apresentado a seguir.

4.1 Equacionamento da fibra de carbono

Para critério de dimensionamento será usado a metodologia americana, ou seja, conforme a norma ACI 440-2017.

Passo 01: Para a resistência da fibra será usado um coeficiente que reduz a resistência da fibra e o mesmo coeficiente será aplicado na deformação.

$$f_{fu} = C_E . f_{fu} \qquad (4.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E . \varepsilon_{fu} \qquad (4.2)$$

f_{fu} = Resistencia da fibra no estado limite último.

C_E = Fator de redução ambiental, retirada da ACI para fibra de carbono é 0,95.

ε_{fu} = Deformação máxima na ruptura da fibra de carbono.

Passo 02: Coeficientes que reduzem a resistência do concreto β_1, é um fator baseado em experimentos de vigas consoante a ACI 318-2017. Logo, para o cálculo será utilizada a equação abaixo. Também será necessário calcular o modulo de elasticidade do concreto.

$$\beta_1 = 1{,}05 - 0{,}05 . \left(\frac{f'_c}{1000}\right) \qquad (4.3)$$

Conforme a ACI 318-2017 para calcular o β_1 é preciso usar a tabela que a norma americana fornece. Conforme tabela abaixo.

Tabela 01: Fator de Resistência

f_c', psi	β_1	
$2500 \leq f_c' \leq 4000$	0.85	(a)
$4000 < f_c' < 8000$	$0.85 - \frac{0.05(f_c' - 4000)}{1000}$	(b)
$f_c' \geq 8000$	0.65	(c)

FONTE: ACI 318-2017

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \qquad (4.4)$$

Passo 03: Cálculo da deformação devido ao peso próprio.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - Kd)}{I_{cr}.E_c} \qquad (4.5)$$

Onde,

ε_{bi} = Deformação devido ao peso próprio.

M_{DL} = Momento devido ao peso próprio.

d_f = Altura da viga.

K = Análise de seção fissurada que vale 0,334

I_{cr} = Momento de inercia

E_c = Módulo de elasticidade.

Passo 04: A ACI 440 impõe que $\varepsilon_{fd} \leq 0{,}9.\varepsilon_u$.

$$\varepsilon_{fd} = 0{,}41.\sqrt{\frac{f'_c}{n.E_f.t_f}} \leq 0{,}9.\varepsilon_{fu} \qquad (4.6)$$

Onde,

n = É a quantidade de fibra de carbono.

E_f = Modulo de elasticidade da fibra de carbono.

f_c = Resistência do concreto.

Passo 05: Diferente da NBR 6118 e da literatura brasileira ensinada em livros renomados de concreto armado, a ACI 440, para solução do problema estima a linha neutra. Logo, é uma solução interativa.

$$c = 0{,}2.d \qquad (4.7)$$

Onde,

c = É a linha Neutra.

d = É altura útil.

Passo 06: Deformação efetiva da fibra de carbono e do concreto.

$$\varepsilon_{fe} = 0{,}003.\left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \qquad (4.8)$$

$$\varepsilon_c = \left(\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}\right)\left(\frac{c}{d_f - c}\right) \qquad (4.9)$$

Onde,

ε_{fe} = Deformação efetiva

d_f = Altura da viga.

c = É a linha Neutra.

ε_c = Deformação do concreto.

ε_{fd} = Representa 90% da deformação última.

Passo 07: Deformação no aço.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{d-c}{d_f-c}\right) \qquad (4.10)$$

Onde,

ε_s = Deformação do aço.

Passo 08: Tensão do aço e da fibra de carbono.

$$f_s = E_s.\varepsilon_s \leq f_y \qquad (4.11)$$

$$f_{fe} = E_f.\varepsilon_{fe} \qquad (4.12)$$

Onde,

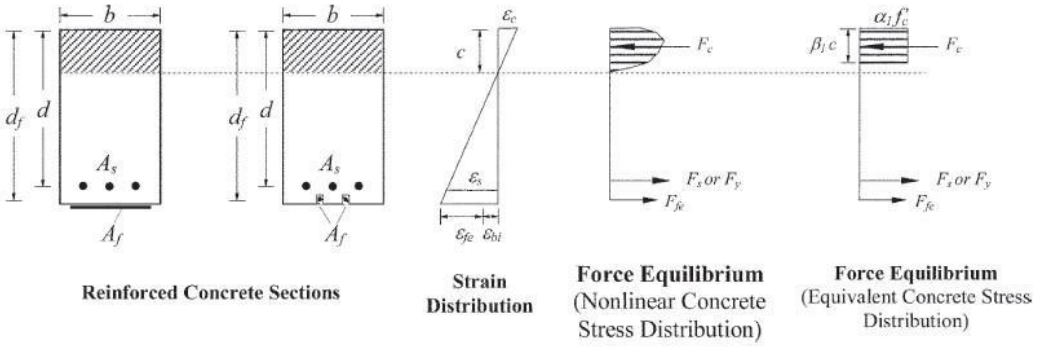
f_s = Tensão de resistência do aço.

$f_{fe} = Tensão\ efetiva\ da\ fibra\ de\ carbono.$

Passo 09: Agora, tem de calcular uma nova linha neutra, caso o valor calculado não seja próximo do valor da linha neutra estimada terá de repetir o processo até que as duas linhas neutras sejam próximas. Para isso, é preciso encontrar os coeficientes $\beta_1, \alpha\ e\ \varepsilon'_c$ (ACI 440, 2017)

A figura abaixo demonstra a aplicação dos coeficientes $\beta_1\ e\ \alpha$ semelhante a NBR 6118 que reduz a resistência do concreto, ou seja, dando mais segurança no método aplicado.

Figura 11: Resultante das Forças que Atua na Peça com a Fibra de Carbono



Fonte: ACI 440 (2017)

Para o cálculo dos coeficientes β_1 e α a ACI 440 fornece equações mostradas a seguir.

$$\beta_1 = \frac{4.\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6.\varepsilon'_c - 2.{\varepsilon_c}^2} \qquad (4.13)$$

$$\alpha_1 = \frac{3.\varepsilon'_c.\varepsilon_c - {\varepsilon_c}^2}{3\beta_1.{\varepsilon'_c}^2} \qquad (4.14)$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1{,}7.f'_c}{E_c} \qquad (4.15)$$

$$c = \frac{A_s.f_s + A_f.f_{fe}}{\alpha_1.f_c.\beta_1.b} \qquad (4.16)$$

Passo 10: O próximo método é interativo, ou seja, o valor estimado tem de ser o mais próximo possível do novo valor da linha neutra conforme dito anteriormente.

Passo 11: O momento de resistência do aço e da fibra de carbono tem de ser maior que o momento resistente ao carregamento anteriormente.

$$M_{ns} = A_s . f_s \left(d - \frac{\beta_1 . c}{2} \right) \quad (4.17)$$

$$M_{nf} = A_f . f_{fe} . \left(d_f - \frac{\beta_1 . c}{2} \right) \quad (4.18)$$

$M_{ns} = Momento\ nominal\ de\ resistência.$

$M_{sf} =$ Momento de resistência da fibra de carbono.

No reforço de fibra de carbono é aplicada a espessura da fibra de carbono, posteriormente acha-se o momento resistente.

Passo 12: Neste item se faz uma minoração da resistência, onde $\emptyset = 0{,}9$ e o $\psi_f = 0{,}85$. Ou seja, dando mais segurança a estrutura dimensionada.

$$\emptyset M_n = \emptyset . \left[M_{ns} + \psi_f M_{nf} \right] \quad (4.19)$$

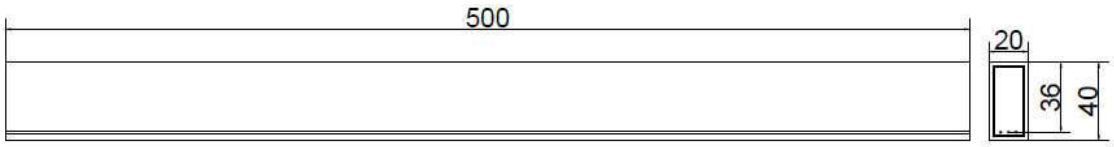
5 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO EM UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO

Para aplicar os métodos de reforço, será utilizada uma viga de concreto armado, com $f_{ck} = 25MPa$, de 5 m de comprimento, e seção transversal de 20x40cm, com cobrimento de 2,0cm, com 3 barras de aço CA-50 de 12,5mm de diâmetro (ver Figura 11), e estribo com diâmetro de 6,3mm espaçados a cada 20 cm. Esta viga, dimensionada para um momento de cálculo de 42kNm, será submetida a um aumento de carga de modo que suscite aumento da resistência à tração.

Posteriormente, será feita uma comparação de dois métodos, a saber: o primeiro, utilizando um acréscimo de barras de aço equivalente; e a segunda solução com utilização da fibra de carbono como reforço.

Por fim, uma análise comparativa entre os dois tipos de reforço. Para tanto, será utilizada a NBR 6118, no dimensionamento das barras de aço adicionais; e a norma americana ACI 440, para o dimensionamento do reforço com fibra de carbono.

Figura 12: Dimensões da Viga



Fonte: AUTORIA 2023

5.1 Método convencional com reforço de barra de aço.

Considerando que a viga da Figura 12 sofrerá um acréscimo de carga, o novo momento fletor de cálculo é de $70\ kN \cdot m$. Desta forma, foi feito um novo dimensionamento, conforme a seguir.

$$70 = (0{,}68.0{,}36.x - 0{,}272.x^2)0{,}2.\frac{25000}{1{,}4}$$

$$x = 9\ cm$$

$$z = 36 - 0{,}4x10 = 32{,}4cm$$

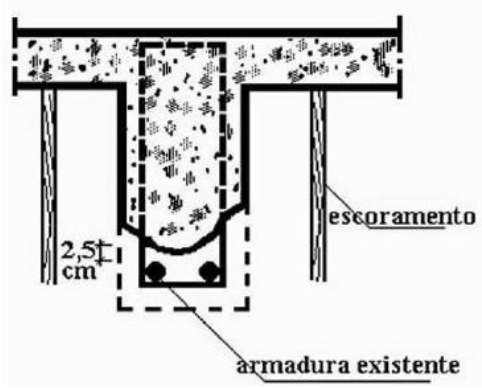
$$A_s = \frac{62}{0{,}32x\frac{50}{1{,}15}} \cong 5{,}13\ cm^2$$

$$n = \frac{5{,}13}{\frac{1}{4}x\pi x1{,}25^2} = 4{,}2 \cong 5\ barras\ de\ 12{,}5\ mm$$

De acordo com o novo dimensionamento, deve-se acrescentar duas barras de 12,5mm na viga analisada, pois com a armadura existente não resistirá a nova solicitação. Logo, o reforço será feito por aumento da armadura longitudinal. A profilaxia, para combater a nova carga, será aumentar o número da seção transversal e implantar um número maior de barras longitudinais.

Conforme SOUZA E RIPPER (1998) para a implantação da armadura de reforço, inicialmente, deve-se escorar a laje nas proximidades da viga. Em seguida, remover parte do concreto existente de modo a expor a armadura longitudinal existente, a figura 13 ilustra como seria o procedimento. Em seguida, fixa-se no concreto, por meio de adesivo epóxi, ganchos por onde se apoiarão as barras adicionais conforme a Figura 14. Segundo HELENE (1992), tal procedimento deve ser bem executado para manter a aderência do concreto com a nova armadura, além disso o concreto tem de ser o menos poroso possível para evitar carbonatação e corrosão posteriormente.

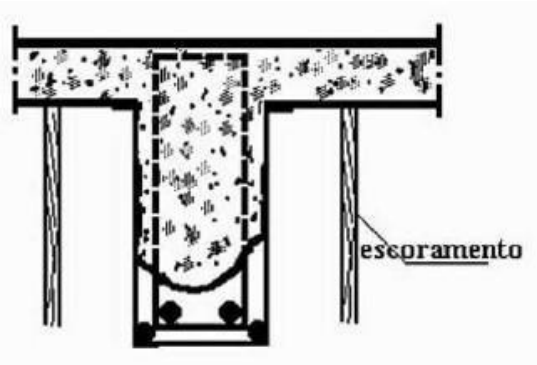
Figura 13: Reforço da Armadura Longitudinal



Fonte: SOUZA E RIPPER, 1998

A forma deve ser confeccionada de modo que o concreto vertido em uma lateral, e seu excedente saiam pela outra lateral, para garantir que não haja nichos de concretagem devido ao aprisionamento de ar. Após a pega, o concreto excedente pode ser removido para devolver o formato retangular à seção transversal. Vale ressaltar que o concreto utilizado pode ser formato por brita 0 ou por agregado menor (“pedrisco”), com certa fluidez, para facilitar a concretagem.

Figura 14: Armadura Longitudinal Implantada



Fonte: SOUZA E RIPPER, 1998

Para o reforço com barra de aço, a princípio é preciso analisar a situação, a viga em estudo, por exemplo, apresentou problemas na armadura longitudinal. A profilaxia, para combater o excesso de carga, será aumentar o número da seção transversal e colocar um número maior de barras longitudinais e aplicar o escoramento. (SOUZA E RIPPER, 1998).

Conforme a Figura 13, a armadura longitudinal fica exposta, logo a importância do escoramento, a próxima etapa é acrescentar a área de aço que na solução do exemplo anterior será acrescentar 2 barras de aço com 12,5 mm. O próximo passo será colocar os ganchos e o concreto, serviço que tem de ter muita atenção pois é um momento delicado. Logo, além de ter atenção no procedimento executivo é preciso ter atenção na escolha dos insumos, no exemplo visto a peça de concreto armado, uma viga, foi reforçada contra esforço a flexão. No entanto, se a viga não resistisse ao esforço cortante a técnica precisaria de um aumento nas armaduras transversais, deixando a aplicação para esse tipo de reforço um pouco mais complexa. (SOUZA E RIPPER, 1998).

5.2 Exemplo de Cálculo para Reforço com Fibra de Carbono

Para combater a nova solicitação de carga flexão, será instalada na viga, um reforço estrutural em fibra de carbono. Para isso, serão implantadas 2 fibras com espessura de 1,5 mm, nota-se que para analisar o dimensionamento o projetista tem de estimar a espessura e quantidade da fibra. Com o auxílio de ACI 440-2017 será calculada a nova resistência da viga com o compósito de carbono e posteriormente, verificar se sua resistência supera a nova solicitação.

Passo 01:

$$f_{fu} = C_E . f_{fu} = 0{,}95 \cdot 621 = 590 \ N/mm^2$$
$$\varepsilon_{fu} = \ C_E . \varepsilon_{fu} = 0{,}95 \cdot 0{,}015 = 0{,}0143$$

Passo 02:

$$\beta_1 = 0{,}8$$
$$E_c = 4700.\sqrt{fc} = 4700\sqrt{25} = 23500\ N/mm^2$$
$$A_s = 3 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 12{,}5^2\right) = 368\ mm^2$$
$$A_f = 2 \cdot 1{,}5 \cdot 200 = 600mm^2$$

Passo 03:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_k.\left(d_f - K.d\right)}{I_{cr}.E_c} = \frac{(31{,}25\ N.mm)x10^3 \cdot (400mm - 0{,}334 \cdot 360mm)}{(102{,}42x10^6 mm^4) \cdot (23500N/mm^2)} = 0{,}0000041$$

Passo 04:

Neste item, a quantidade de fibra de carbono tem de ser referenciada, logo será adotada 2 lâminas de fibra de carbono com $1{,}5\ mm$.

$$\varepsilon_{yd} = 0{,}41.\sqrt{\frac{f'_c}{n.E_f.t_f}} = 0{,}41 \cdot \sqrt{\frac{20MPa}{2 \cdot 37000N/mm^2 \cdot 1{,}5mm}} = 0{,}006$$

Logo, $0{,}0055 < 0{,}9 \cdot 0{,}0143 = 0{,}01287$ obedecendo aos critérios da ACI 440.

Passo 05:

Esse é um dos momentos mais delicados do dimensionamento. Isso porque, a ACI 440 trabalha com processos iterativos, logo, será preciso estimar a linha neutra.

$$c = 0{,}2 \cdot d = 0{,}2 \cdot 360mm = 72mm$$

Passo 06:

$$\varepsilon_{fe} = 0{,}003.\left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} = 0{,}003 \cdot \left(\frac{400mm - 72mm}{72mm}\right) - 0{,}006 = 0{,}0137 > 0{,}006$$

- Como $\varepsilon_{fe} > \varepsilon_{yd}$,portanto, conforme a norma americana ACI 440 o valor será $\varepsilon_{fe} =$

0,006.

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{c}{d_f - c}\right) = (0{,}006 + 0{,}0000041) \cdot \left(\frac{72mm}{400mm - 72mm}\right) = 0{,}001209$$

Passo 07:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{d - c}{d_f - c}\right) = (0{,}009 + 0{,}0000042) \cdot \left(\frac{360mm - 72mm}{400mm - 72mm}\right) = 0{,}0054$$

Passo 08:

$$f_s = E_s.\varepsilon_s = 200KN/mm^2 \cdot 0{,}0048 \ = 0{,}414KN/mm^2$$
$$f_{fe} = E_f.\varepsilon_{fe} = 37KN/mm^2 \cdot 0{,}006 = 0{,}2KN/mm^2$$

Passo 09:

$$\beta_1 = \frac{4.\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6.\varepsilon'_c - 2.{\varepsilon_c}^2} = \frac{4 \cdot 0{,}0012 - 0{,}00121}{6 \cdot 0{,}0012 - 2 \cdot 0{,}00121} = 0{,}748$$

$$\alpha_1 = \frac{3.\varepsilon'_c.\varepsilon_c - {\varepsilon_c}^2}{3\beta_1.{\varepsilon'_c}^2} = \frac{3 \cdot 0{,}0012 \cdot 0{,}00121 - 0{,}00121^2}{3 \cdot 0{,}784 \cdot 0{,}0012^2} = 0{,}883$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1{,}7.f'_c}{E_c} = \frac{1{,}7 \cdot 20MPa}{\frac{27600KN}{mm^2}} = 0{,}0012$$

$$c = \frac{A_s.f_s + A_f.f_{fe}}{\alpha_1.f_c.\beta_1.b} = \frac{368{,}15mm^2 \cdot 0{,}414\left(\frac{KN}{mm^2}\right) + 600(mm^2) \cdot 0{,}2\left(\frac{KN}{mm^2}\right)}{0{,}883 \cdot (20MPa) \cdot 0{,}748x200mm}$$

$$c = 103{,}96\ mm$$

Portanto, consoante a norma ACI 440, a primeira estimativa não deu certo, porque, as linhas neutras não convergiram para um mesmo ponto, a estimada deu 72 mm enquanto a calculada 103,96 mm. A próxima linha neutra com auxílio do Excel será $c = 0{,}257.d$.

Logo, refaz todos os cálculos, e confere se a linha neutra convergiu para o mesmo

ponto. Com a nova linha neutra analisada, os valores convergem. Essa iteração é o passo 10.

Passo 11:

$$M_{ns} = A_s.f_s\left(d - \frac{\beta_1.c}{2}\right) = 368{,}15(\mathrm{mm^2}) \cdot 0{,}414\left(\frac{\mathrm{KN}}{\mathrm{mm^2}}\right) \cdot \left(36(\mathrm{mm}) - \frac{0{,}703 \cdot 45{,}34(mm)}{2}\right)$$

$$M_{ns} = 49{,}214\mathrm{KN.m}$$

$$M_{nf} = A_f.f_{fe}.\left(d_f - \frac{\beta_1.c}{2}\right) = 600(mm^2) \cdot 0{,}2\left(\frac{\mathrm{KN}}{\mathrm{mm^2}}\right) \cdot (400(mm) - \frac{0{,}703 \cdot 45{,}34(mm)}{2} =$$

$$M_{nf} = 44{,}337\ KN.m$$

Passo 12:

$$\emptyset M_n = \emptyset.\left[M_{ns} + \psi_f M_{nf}\right] = 0{,}9 \cdot [52{,}44(KN.m) + 0{,}85 \cdot 46{,}923(KN.m)] = 83{,}484\ KN.m$$

Portanto, usando a fibra de carbono com 1,5 mm como reforço estrutural, ela consegue resistir bem a nova solicitação. A dificuldade está em como encontrar a linha neutra que é um processo iterativo. Logo, é preciso estimar e analisar se a linha a nova linha neutra converge para o mesmo resultado. Conforme mencionado a praticidade e rapidez da fibra de carbono e sua resistência a tração é um ponto crucial na escolha do método.

Por não ter uma norma brasileira que fale sobre como dimensionar um reforço estrutural com fibra de carbono a ACI440-2014 mostra o passo a passo de como fazer.

6 CONCLUSÃO

Dentre muitos reforços estruturais, a fibra de carbono se mostrou eficiente, pois além de preservar a geometria da estrutura também aumenta a resistência e não ocupa muitos espaços comparados aos outros métodos tradicionais

Em relação a sua aplicação, o método apresentado neste presente trabalho foi por reforço externo à flexão. Para resistir a um momento de $70\ kN.m$ considerando o reforço por adição de barras seria necessária adição de 2 barras de aço de 12,5mm para o reforço convencional, no reforço com fibra de carbono foram acrescentadas 2 placas com 1,5 mm x 200mm de espessura largura respectivamente. A fibra de carbono possibilitou um aumento de resistência da viga para $83{,}484\ KN.m$ o que corrobora para eficiência da fibra de carbono no quesito resistência.

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se a aplicação em uma laje de concreto armado e avaliação da deformação(flecha) em elementos de concreto armado reforçados com fibra de carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **Building Code Requirements for Structural** Concrete (ACI 318-2017) and Commentary.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE **– Guidelines For Prestressing Concrete Structures With FRP Tendons** - (ACI Subcommittee 440, 2017).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. São Paulo: ABNT, 2014.

ARAÚJO, J M. **Curso de Concreto Armado**. Vol. 2 e 3 ed. Editora Dunas, Rio Grande, 2014.

BASTOS, P. S. **Flexão Normal Simples – Vigas**. UNESP – Campus Bauru São Paulo, 2020.

BEER, F. P.; E. JOHNSTON, Russell Jr., DEWOLF, John T.; MAZUREK, David. F. **Mecânica dos Materiais.** 7. ed. McGraw-Hill, 2021.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. São Paulo: Pini, v. 2, 2014. 415p.

MACHADO, A. P. – **Fibras de Carbono – Manual Prático de Dimensionamento**– Edição BASF – 2006.

SOUZA, V. C. M. D.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo. Ed. Pini, 1998.

SILVA, J. P. **A trajetória de um calculista de estruturas.** Natal, RN: Autor 2009

HELENE, P. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo, ed. Pini, 1992.