



APLICAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO PARA REFORÇO EM VIGAS DE CONCRETO

BELOTTO, Victor; MORAES, Vinicius Aquino Sinto;
Orientador: Prof. (Me) Ricardo Simões – Universidade São Francisco
victorbelotto37@gmail.com; vini.sinto@hotmail.com

RESUMO.

Este presente trabalho, visa apresentar como é feita a aplicação da fibra de carbono para reforço em vigas de concreto. Levando em conta as recorrentes intervenções de reforço necessárias em estruturas de concreto armado, seja por falhas de projeto, falhas de execução ou durante sua vida útil, devido a ocorrências patológicas ou manutenções correntes, é de suma importância que haja um conhecimento adequada para sua realização. A fibra de carbono, apesar de não ser tão utilizada como os outros métodos de reforço, vem cada vez mais, conquistando seu espaço no mercado. Neste contexto, este trabalho tem como principal objetivo demonstrar como é feita sua aplicação em um reforço estrutural, mostrando desde o início, contando um pouco da sua história, como ela é feita, sua utilização, como é aplicada, assim como seus métodos de aplicação que exigem um conhecimento aperfeiçoado, suas vantagens e desvantagens em relação aos demais métodos convencionais e faremos algumas comparações entre a utilização da fibra de carbono para reforço estrutural e outros métodos de reforço, mostrando qual dos casos tem a melhor solução, agilidade e custo-benefício.

Palavras-chave: Reforço estrutural, Concreto, Fibra de Carbono, Polímeros, Aplicação.

ABSTRACT.

This present work aims to present how the application of carbon fiber is made to reinforce concrete beams. Taking into account the recurrent reinforcement interventions necessary in reinforced concrete structures, whether due to design failures, execution failures or during their useful life due to pathological occurrences or current maintenance, it is of paramount importance that there is adequate knowledge for their realization. Carbon fiber, despite not being used as much as other reinforcement methods, has been gaining more and more space in the market. In this context, this work has as main objective to demonstrate how its application is made in a structural reinforcement, showing from the beginning, as a little of its history, how it is made, its use, how it is applied, as well as as its application methods that require improved knowledge, its advantages and disadvantages in relation to other conventional methods and we will make some comparisons between the use of carbon fiber for structural reinforcement and other reinforcement methods, showing which of the cases has the best solution, agility and cost- effectiveness.

Keywords: Structural reinforcement. Concrete. Carbon fiber. Polymers. Application.



INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa dimensionar o reforço estrutural em fibra de carbono em uma viga de concreto armado, a fim de comprovar a eficácia do material na recuperação das características estruturais da peça.

Conforme Fabiane Breda (2018) em 1879 Thomas Edison carbonizou fios de algodão ou bambu os transformando em fibra de carbono, que eram utilizadas como filamento nas lâmpadas inventadas por ele. Quando o tungstênio se tornou um material mais popular para o uso como filamento, essa fibra foi ficando de lado. Na década de 1950 os Estados Unidos começaram a utilizar a fibra de carbono para o desenvolvimento de pontas de injetor para foguetes, uma vez que exigia uma alta resistência ao calor.

Já as fibras de alto desempenho só foram inventadas em 1958, essas fibras continham 20% de carbono e eram pouco eficientes. Em 1959, foi inventado um novo método para a fabricação da fibra em que consiste na carbonização do poliacrilonitrilo, a partir daí as pesquisas e desenvolvimento envolvendo esse composto aceleraram. Somente em 1963 foi desenvolvido um novo processo de fabricação em que foi realizado o potencial de força da fibra.

A fibra de carbono nada mais é do que vários filamentos de átomos de carbono que formam os fios e posteriormente podem ser utilizados sozinhos ou na forma de tecidos. Para se obter seu melhor desempenho ela tende a ser combinada com resinas termofixas, como epóxi, poliéster, estervinílicas ou fenólicas. A junção da fibra com algum desses materiais, possibilita melhores propriedades mecânicas, físicas e químicas. (BRITZKI,2016)

Esse polímero também é conhecido como fibra de grafite, sendo extremamente resistente e leve, cinco vezes mais forte que o aço e duas vezes mais rígida. Essas fibras são unidas por um polímero chamado matriz (resina) que funciona como uma espécie de cola, que une essas fibras na forma de fios, e assim da força no interior do conjunto.

As fibras de carbono possuem várias propriedades muito importantes, como: boa resistência elétrica e térmica, inércia química, exceto a oxidação, elevada resistência à tração, baixa massa específica e alto módulo de elasticidade.

Além da sua alta resistência a tração e baixo peso, a fibra de carbono também possui alta resistência química e térmica. Por conta disso esse material é muito utilizado em diversas indústrias, porém seu uso é limitado devido ao alto custo.

A fibra de carbono é altamente utilizada quando existe a necessidade de utilização de um material que seja de alta resistência e de baixo peso. São comuns em automóveis, aeronaves, equipamentos esportivos e hastes, assim como na indústria química e em componentes médicos. Na engenharia civil existem casos em que os reparos com a fibra de carbono são mais baratos que uma eventual demolição e reconstrução.

As fibras de carbono na maioria das vezes são fabricadas por meio de um processo chamado pirólise controlada de fibras plásticas. Esse processo faz com que essas fibras sejam submetidas a temperaturas extremamente altas (mais de 800 °C), após isso, o material é decomposto e convertido em um material sólido. A poliacrilonitrila é o material mais usado para a produção das fibras de carbono, podendo ser chamado de orlon, acrilon e darlon também, que é um polímero de adição formado por adições sucessivas de monômeros de acrilonitrila. (FOGAÇA; BREDA,2018).

A fibra de carbono está presente desde em aeronaves, até em bicicletas, está presente em acessórios de esporte e automobilísticos. Ela é composta, em sua maioria por filamentos

de carbono, o que a torna leve e resistente, sendo uma ótima opção alternativa ao ferro. Essa possibilidade de substituir outras ligas a tornou muito presente no nosso cotidiano.

Para atingir seu potencial total, a cola utilizada para a aplicação da fibra deve ser da mais resistente. Portanto a resina epóxi de alto desempenho é a mais indicada, pois a cola e a fibra se misturam formando um elemento unificado.

Uma das grandes vantagens do uso da fibra de carbono na construção civil, além de sua alta resistência e maior leveza, comparado ao ferro, é sua durabilidade. Por ser um material inoxidável não sofre com corrosão e sua vida útil é muito maior. (HAMANN; TEIJIN CARBON, 2017)

A estrutura é a base do projeto arquitetônico, é fundamental para a segurança e solidez da edificação. O supervisionamento por profissional qualificado é de extrema importância desde o início da obra, levando em conta sua importância e pelo gasto com a estrutura do empreendimento ser um dos mais altos do orçamento.

A estrutura tem como função manter a edificação em pé, assim como o esqueleto no corpo humano. Os elementos estruturais mais comuns são os pilares, vigas e lajes, além dos elementos que constituem a fundação. Com a modernização das técnicas construtivas, os métodos e tipos de construção vem se alterando e evoluindo, e os elementos estruturais não são diferentes. Dentre os tipos mais comuns de estrutura presente na construção civil podemos citar a alvenaria estrutural, o concreto armado, as estruturas metálicas e o concreto protendido.

A alvenaria estrutural é um dos tipos de estrutura mais comuns na construção civil, por serem seguros, resistentes e possuir um custo menor comparado aos outros tipos de estrutura presentes no mercado. Consiste em blocos e tijolos de concreto com função estrutural, esse tipo de obra não necessita de vigas e pilares como as obras de concreto armado, pois nesse caso os blocos exercem essa função.

Esse tipo de obra apresenta um bom custo benefício, porém existem certas limitações na execução. Como os blocos exercem o papel estrutural, na maioria dos casos sua execução não aceita reformas, uma vez que quebrar uma parede é expressamente proibido. Por conta disso, a maior parte das obras em alvenaria estrutural presente no cotidiano diz respeito a construção de apartamentos padronizados, normalmente não ultrapassando cinco pavimentos.

As estruturas em concreto armado são as mais comuns na construção civil, e consiste na combinação do concreto e das barras de aço, proporcionando tanto uma resistência a compressão quanto a tração, ideias para resistirem aos esforços presentes nas edificações, se destacam por essa resistência, pela durabilidade e por sua eficiência.

Esse tipo de estrutura apresenta bom custo benefício referente a mão de obra, porém seu lado negativo é o tempo de cura do concreto, sendo necessário aguardar um período para que ele seque, podendo atrapalhar no andamento da obra, exigindo um bom planejamento de execução.

As estruturas metálicas consistem no uso de perfis de aço para execução de vigas e pilares com função estrutural. Esse tipo de estrutura se tornou bastante popular nos Estados Unidos e é bastante usado na construção de casas, indústrias, hospitais, canteiros de obras, ginásios esportivos, entre outros. Um grande ponto positivo das construções em estrutura metálica é sua ótima isolamento térmica e acústica, mantendo a temperatura interna mais confortável e reduzindo a transmissão de ruídos no interior da edificação.

As estruturas de concreto protendido consistem na tensão do aço antes da concretagem da peça, assim suportando maiores níveis de esforço. Deve ser feito usando aço de maior resistência e com concreto de resistência superior aos comumente usados. Esse tipo de estrutura possibilita vencer vãos muito maiores e são mais utilizados em lajes de edifícios, pontes e viadutos. (JÚNIOR, 2021)

Uma das principais vantagens de se utilizar a fibra de carbono, é seu baixo peso específico e resistência mecânica superior em relação aos outros métodos de reforços. Sendo também que sua utilização suporta de uma maneira mais eficiente ambientes agressivos.

A resistência mecânica em tração, acontece devido ao perfeito alinhamento dos átomos de carbono ao longo da fibra; A resistência a corrosão, se deve ao fato de que é mais resistente em relação ao aço devido às suas ligações químicas. As fibras possuem também módulos de elasticidades superiores quando em comparação ao aço. Esse método é utilizado principalmente por não aumentar significativamente a seção da estrutura, não reduzindo sua área livre dos pavimentos.

A resina epóxi é o material mais compatível, por possuir uma melhor aderência do compósito com o concreto. Esse adesivo transfere as tensões tangenciais do material para o concreto, estabelecendo a integridade de ambas.

O CFC (compósito de fibra de carbono), pode ser utilizado de várias maneiras, tanto para absorver flexão e cisalhamento, usado em lajes para aumentar sua resistência à flexão, pilares e colunas para aumento de resistência a flexão e à compressão axial por meio de confinamento, em vigas sua utilização potencializa a absorção dos esforços dos momentos fletores, que provocam tração e cisalhamento da peça.

As etapas construtivas do CFC, acontecem da seguinte maneira: Primeiramente, deve-se fazer um pré estudo da estrutura a ser reforçada, para saber a quantidade de CFC a ser utilizada, a área a ser tratada, lavamento das tiras, comprimento e largura, para minimizar perdas, tendo em vista que é um material com custo altamente elevado. Após isso, deve-se fazer a marcação no concreto que vai ser feito o reparo, caso haja alguma deformidade, deve ser tratada antes dessa marcação.

Após isso, é feito um lixamento nos locais de aplicação para que haja uma melhor aplicação da manta, depois é feita a limpeza da área e a saturação da superfície com primer para regularizar o local. Depois é aplicado a resina de impregnação para estabelecer uma ponte de aderência entre a resina de laminação e o concreto. Nesse processo da aplicação da resina, deve-se ter um cuidado em relação ao tempo de cura do material, já que é bem baixo.

Em seguida aplica-se a resina de laminação para colar o compósito e após todos esses processos é feita a aplicação da fibra de carbono para reforçar a estrutura. E por último recomenda-se a aplicação de pinturas de proteção contra incêndios, raios ultravioletas, etc. (INTECH ENGENHARIA)

O reforço estrutural é utilizado quando se necessita fazer uma alteração em alguma peça de concreto armado, seja por estar sujeitas a sobrecargas não previstas no projeto original, ou por uma reforma da edificação que possa fragilizar sua estrutura. A principal função de um reforço estrutural é aumentar a resistência das peças de concreto armado, a partir do acréscimo de armaduras ou aumento da seção geométrica. A solução mais utilizada hoje em dia é o reforço de concreto com chapas de aço, mas com o avanço da tecnologia e novas descobertas, o reforço estrutural com fibra de carbono vem ganhando espaço nesse mercado.

Temos 5 motivos que podemos optar pelo uso da fibra de carbono para reforços estruturais, o primeiro é a agilidade e redução no tempo da obra, tendo em vista que em apenas 7 dias a fibra de carbono atinge 100% da sua resistência, enquanto o concreto precisa de 30 dias, reduzindo de 60% a 70% o tempo de realização de uma obra.

O segundo motivo é a praticidade, pelo fato da sua aderência junto ao concreto ser feita com resina epóxi, fazendo com que haja a diminuição no tempo de aplicação do material, após 24 horas da aplicação, já é possível recobrir com materiais diversos, como rebocos, gessos e argamassas.

O terceiro é a maior durabilidade que ela oferece devido às suas altas propriedades mecânicas, já que seu coeficiente de dilatação é mínimo, tem uma alta rigidez e resistência excepcional a ataques químicos, fazendo com que não haja corrosão.

O quarto motivo para se optar pela fibra de carbono é a alta resistência que ela oferece em relação aos outros métodos de reforços, duas das suas principais propriedades é a alta resistência a tração e elevado módulo de elasticidade, fazendo com que ela suporte impactos de maior intensidade sem gerar danos a estrutura.

E o quinto e último motivo é sua baixa densidade, não provocando aumento da sobrecarga, por isso é utilizada bastante em áreas que não é possível a alteração do plano arquitetônico, como garagens e locais com portas e janelas. (CONSTRUCT, 2018)

Uma grande vantagem da utilização da fibra de carbono em reforço estrutural é seu uso em superfícies não regulares, sendo possível a aplicação da manta em diversas superfícies sem que ocorra alteração de suas propriedades estruturais. Além disso a fibra é amplamente utilizada em diversas áreas em que ocorre exposição a agentes químicos, assim como agentes externos.

Para ser aplicada em fissuras, primeiro deve-se recuperar o substrato do concreto, necessário para maior eficiência de adesão. A recuperação deve ser feita com injeção de resina epóxi ou similar, para que seja feita a aplicação da manta de fibra. Essa aplicação deve ser feita para que os poros e vazios sejam preenchidos e a superfície regularizada, a fim de receber a manta. (LEAL; FAGUNDES, 2020)

Outra vantagem de seu uso é a sua alta durabilidade, uma vez que a camada de fibra de carbono protege o elemento estrutural da ação do tempo, aumento assim sua vida útil e sua capacidade de resistência, conservando suas características estruturais por muito mais tempo.

Por fim, devemos levar em conta que nem todo problema estrutural é resolvido com a fibra de carbono, o que torna indispensável o apoio de empresas e profissionais especializados nesse tipo de material e técnica de reforço, para que sua execução seja segura, eficaz e precisa. (ENGENHARIA, SERPOL, 2019)

A execução desse método é feita com fixação do reforço na estrutura com uma resina a base de epóxi, mas antes disso é necessário todo um procedimento para que se obtenha um desempenho esperado. O procedimento deve começar realizando uma recuperação e preparo do substrato do concreto para receber o material, sua aplicação tem algumas diferenças de aplicação, dependendo do tipo do produto, se é manta ou lâmina. Essa preparação é importante porque garante que a superfície disponha de uma resistência mecânica suficiente para que as transferências de esforços sejam procedidas, que acontecem na interface entre o concreto e a fibra de carbono. Esse processo de preparação e limpeza visa remover poeiras, substâncias oleosas, graxa, partículas sólidas ou revestimentos.

Após todo esse processo, é feita a aplicação de um primer sobre a superfície para impregnação dos poros para que haja uma ponte de aderência entre os dois elementos. Após duas horas da aplicação do primer, já pode ser efetuada a aplicação da resina epóxi, e logo após a saturação é feita a colocação da fibra, já que o tempo de aplicação da resina é muito curto, apenas 25 minutos. O tempo de cura do reforço em fibra de carbono vai de fabricante para fabricante, mas em média, são sete dias.

Após a finalização da aplicação, pode ser utilizado alguns métodos de acabamento para fins estéticos ou para proteção contra fogo, corrosão e radiação ultravioleta, como o concreto projetado ou pintura. (MAZER, 2022)

A origem das fibras de carbono resulta de um tratamento térmico chamado carbonização de fibras precursoras orgânicas, como o poliácridonitril ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou carvão, ou também através de fibras de rayon. O processo consiste na oxidação das fibras elevando elas a temperaturas de 1000°C a 1500°C. Esse processo faz com

que os átomos de carbono fiquem completamente alinhados ao longo da fibra precursora, dando uma ótima resistência mecânica ao produto final.

O polímero começa a “amolecer” a partir de uma certa temperatura, que é chamada de transição vítrea, esse valor depende especificamente do tipo de resina, mas geralmente fica entre 80°C a 100°C. Estudos feitos, mostram que temperaturas na casa dos 240°C, um valor bem acima do Tg (Transição Vítrea), o material tem uma redução de 20% na resistência à tração.

A execução desse sistema é feita da seguinte maneira, primeiro deve-se fazer uma recuperação do local onde a fibra será aplicada para que o sistema possa ser aderido com segurança, depois é feita uma imprimação da superfície que será aplicado o sistema, criando uma interface altamente eficiente para a transmissão de esforços entre o composto e a peça de concreto, e para isso é utilizado um primer, após essas duas etapas, é feita uma regularização e correção de imperfeições presentes na peça de concreto para que se obtenha uma superfície nivelada, depois é aplicada a primeira camada de resina saturante com alto teor de sólidos para impregnar a lâmina de fibra de carbono e aderi-la a superfície de concreto, após isso é aplicada a lâmina de fibra de carbono para reforçar o sistema, depois a segunda camada de resina saturante para completar a impregnação da lâmina e depois pode-se aplicar uma película de acabamento para proteção e/ou acabamento estético.

Esse sistema pode ser utilizado para várias maneiras de reforços, como reforço de vigas à flexão e a corte; reforço de lajes à flexão; reforço de pilares e colunas; reforço de tanques, silos e reservatórios; reforço de muros de arrimo, vigas-parede, alvenarias e melhoria da resistência a impactos e explosões; reforço de tubulações de concreto de grande diâmetro; aumento da ductibilidade de colunas para a prevenção de efeitos sísmicos. (MACHADO, 2022)

Quando falamos de reforço de estruturas de concreto, pode-se destacar duas aplicações principais, uma delas é a reabilitação ou restauração de elementos estruturais, que foram enfraquecidos ou rompidos por manifestações patológicas específicas; ou reforçar elementos estruturais em ótimas condições, esse caso geralmente é feito quando necessita-se aumentar a resistência do mesmo para suportar maiores cargas do que o projeto inicial suporta, devido à mudança de carregamento.

Temos 4 técnicas de reforços que se destacam entre as mais utilizadas: primeira é o aumento da seção transversal do elemento, que consiste na colocação de camadas de concreto, com o objetivo de reforças. Pode ser usada em pilares, vigas, lajes. Suas principais vantagens são o baixo custo, e a não utilização de materiais complexos. E suas principais desvantagens estão a dificuldade de compatibilização entre o concreto novo com o existente e a dificuldade de se garantir a aderência.

A segunda técnica é a protensão externa, com o objetivo de reforçar, aumentando a capacidade resistente e a diminuição das deformações. Suas vantagens são a simplicidade construtiva, fácil cobrimento dos cabos e a facilidade de inspeção do sistema. E sua desvantagem principal é sua vulnerabilidade, tanto a ações do fogo, corrosão eletroquímica e vandalismo.

A terceira é a chapa de aço colada, elas são coladas através de adesivos epóxi. Sua principal vantagem é sua fácil execução quando as chapas são pequenas, eficiência e pequena alteração das dimensões da peça. E como desvantagem, cita-se a dificuldade de manuseio quando se trata de chapas maiores em espaços reduzidos, impossibilidade do uso de solda após à instalação e temos também a possibilidade de corrosão da chapa.

E a última técnica é a utilização de polímeros reforçados com fibras, que utiliza a fibra embebida em uma matriz de resina, formando o composto. Pode-se utilizar para esta técnica a fibra de vidro, aramida e a fibra de carbono. Suas principais vantagens são: a facilidade de instalação sua leveza, ausência de corrosão e são utilizados na forma de barras, laminados ou

folhas. E como desvantagens cita-se a vulnerabilidade a vandalismo, a impactos, a altas temperaturas e a deterioração por radiação ultravioleta especificamente para a fibra de vidro. (RONCETTI, 2011)

Para realizar um reforço estrutural através da fibra de carbono, é necessário realizar algumas etapas para que seu desempenho seja 100%. A primeira é a preparação da superfície em que será aplicada, fazendo um lixamento visando remover qualquer imperfeição que possa comprometer a aderência da fibra.

É importante ressaltar que caso haja alguma patologia do concreto, como trincas, armaduras expostas, etc, as mesmas deverão ser tratadas antes da execução do reforço, visando que ela não prescinde de tais tratamentos. Ela é indicada apenas para aumento de carga na estrutura; falhas de projeto, dimensionamento; falhas na execução; reforço estrutural após incêndio; estruturas sujeitas a ambientes agressivos. (PARAMETRICA ENGENHARIA E ARQUITETURA, 2022)

As três etapas do dimensionamento do reforço estrutural à flexão se fazem da seguinte maneira: primeiro é determinado o momento fletor resistente da peça; após isso é determinado a deformação inicial da peça, devido apenas às cargas permanentes; por fim é dimensionado o reforço necessário utilizando a relação de equilíbrio da estrutura.

Para o cálculo do momento fletor, usamos as propriedades dos materiais, propriedades das peças e propriedades da armadura já existente, como indicado na norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014). As deformações iniciais existentes na estrutura não devem ser levadas em conta no cálculo da deformação final encontrada para a fibra de carbono, para assim ser encontrada o valor real da tensão a ser trabalhada pela fibra.

Uma vez que a viga foi projetada no ELU (Estado Limite Último), deve-se realizar o equilíbrio dos momentos interno e externo em dois pontos da seção transversal, onde o primeiro ponto deve ser feito no eixo da armadura tracionada; já o segundo ponto deve ser feito no eixo da resultante de compressão do concreto. Para haver o equilíbrio da estrutura é preciso determinar a posição correta da linha neutra, uma vez que o momento interno resistente encontrado deve ser o mesmo em qualquer ponto da seção transversal.

Com essas informações é possível realizar o reforço, deve ser feita a preparação do substrato, limpeza e regularização da superfície. Após isso é feita a aplicação da resina epóxi para aderência entre o CFC e a estrutura. Em seguida é feita a colagem da fibra de carbono, primeiramente executando o reforço a flexão de depois o reforço ao cortante. (LORENZI, Bruna Rafaella Gonçalves de, 2018).

O estudo diz respeito a uma comparação entre duas técnicas de reforço estrutural, uma feita com chapa de aço e outra com manta de fibra de carbono, além de apresentar com detalhes cada material. A fibra de carbono, em resumo, é obtida através da decomposição térmica de matérias primas ricas em carbono e o alcatrão, depois de sua decomposição, um tratamento térmico se faz necessário.

A chapa de aço é uma liga de ferro e carbono, cujas propriedades mecânicas podem ser modificadas com tratamento térmico, dependendo da necessidade de utilização. Por não ter em sua composição elementos de liga, o aço carbono pode ser subdividido em baixo, médio e alto carbono. O carbono é responsável por aumentar a resistência do aço e sua dureza, porém, sua principal desvantagem é a dificuldade de soldagem, uma vez que ocorre mudanças de suas propriedades, reduzindo sua ductilidade. Existem vários tipos de fabricação como: barras, chapas ou perfis.

Como conclusões finais para ambas as técnicas apresentadas: não fora alcançado o objetivo de chegar a um coeficiente de segurança para reforços, devido a ruptura dos corpos de prova pelo esmagamento do concreto; a resina, que era uma preocupação, acabou sendo uma surpresa, uma vez que não houve o desprendimento dos materiais; ambos são de fácil execução, dando destaque para o reforço com chapas de aço, por sua facilidade de aplicação e

manuseio; como foi citado acima, não foi possível obter o resultado de ruptura máxima dos esforços, porém sua eficiência foi provada, devido ao aumento da carga última na ruptura para esmagamento do concreto das vigas reforçadas; as vigas com reforço em fibra de carbono obtiveram uma variação de carga de fissura e ruptura bem inferiores ao reforço com chapa de aço; e por último, o ensaio evidenciou que o reforço com manta de fibra de carbono deixou a estrutura menos dúctil. (RISO, Bruno, 2018)

Basicamente, temos três métodos de reforço em estruturas: o primeiro e o segundo são comuns e mais utilizados, que são feitas pela adição de armadura com aumento da seção transversal de concreto ou adição de chapas/perfis de aço à estrutura; e temos a adição de fibra de carbono à estrutura, que é menos utilizado, mas tem tido um crescimento significativo no ramo, levando em conta suas vantagens e desvantagens em relação aos outros métodos. No reforço com adição de chapas ou perfis metálicos, são usados, as chapas ou perfis, resina epoxídica e tinta anti-corrosiva. Na escolha do tipo de aço, é levado em consideração aspectos como: meio ambiente onde as estruturas se localizam; previsão do comportamento estrutural de suas partes; meio industrial com atmosfera agressiva à estrutura; proximidade da orla marítima; manutenção necessária e disponível ao longo do tempo.

No reforço com adição de armadura e aumento da seção transversal, os materiais mais utilizados são: barras de aço; graute; resina epoxídica e fôrmas. Nesse método, o primeiro passo é escorar o entorno para que seja possível a escarificação da superfície, após isso são feitos furos onde serão ancoradas as barras de aço e depois elas são embutidas no concreto. Depois é feita a montagem das formas, verificando uma vedação completa para que o graute fique confinado em seu interior, devido a sua alta fluidez.

A conclusão final do estudo de caso da comparação entre o método de adição de armadura e aumento da seção transversal para reforço estrutural e o reforço com compósito de fibra de carbono é que a fibra de carbono leva vantagem em relação ao custo, sendo que tem uma economia de quase quatro vezes em relação ao reforço com adição de armadura; prazo, devido a facilidade de transporte do material, adiantando em uma semana o serviço prestado em relação ao reforço com adição de armadura; facilidade de execução do reforço com compósito de fibra de carbono; o reforço com fibra não gera ruídos, entulhos, pó e vibrações. O único aspecto que o reforço com adição de armadura leva vantagem é quando se trata de resistência ao fogo, levando em consideração que as resinas utilizadas no processo de reforço com fibra de carbono não são resistentes à altas temperaturas. (BRONZE, Ricardo Alves, 2016)

Existem diversos tipos de sistema de compósito de fibra de carbono, cada uma possuindo suas próprias características e formas corretas de aplicação. O local onde será utilizado o compósito deve ser muito bem estudado levando em conta a temperatura externado ambiente, a fim de utilizar a resina e método de aplicação ideal para cada caso. Existem dois métodos de utilização do compósito de fibra de carbono destinados a reforço estrutural, conhecidos como In Situ e Pré-Fabricado.

O método de sistema In Situ é denominado dessa forma por ser moldado no local de aplicação, se adaptando as diversas formas de estrutura. As formas mais comuns de se encontrar os compósitos de fibra de carbono nesse método são nas formas de manta, quando as fibras são alinhadas em apenas uma direção; ou na forma de tecido, quando as fibras são orientadas em duas ou mais direções. Quando esse material recebe a resina, ele passa a ser considerado um FRP (fibras reforçadas com polímeros).

Já o método conhecido como Pré-Fabricado é considerado um FRP desde sua produção, uma vez que ocorre a impregnação da resina no compósito na sua fabricação. De modo a garantir a uniformidade e união das fibras, a fim de garantir as características do sistema.

Dentre as características mais importantes a serem levadas em consideração na escolha do material podemos citar: a fadiga do material, por conta do trabalho a ser executado e as forças a serem suportadas pelo material, para que não ocorra uma ruptura e o colapso da peça, uma vez que o modo de ruptura da fibra é frágil, não demonstrando sinais de fissura); também devem ser levado em consideração o peso próprio do material, quesito esse que a fibra de carbono leva vantagem sobre os demais métodos de reforço por sua densidade ser menor que a do aço; e por fim devemos analisar a durabilidade do sistema escolhido, onde mais uma vez a fibra de carbono leva vantagem por não sofrer com os agentes agressivos externos.

Quando ocorre a flexão de uma viga, podemos dizer que existem duas reações distintas: a tração e a compressão. Na maioria dos casos a tração se dá na parte inferior da linha neutra, e a compressão na parte superior.

Utilizamos então o reforço estrutural quando existe uma deficiência na resistência da estrutura, seja em vigas, pilares ou lajes, a fim de recuperar as características estruturais da peça. (LIMA, OLIVEIRA)

METODOLOGIA

Para se comprovar a hipótese apresentada nessa pesquisa será utilizada uma viga hipotética em concreto armado estrutural suportando esforços de flexão. Nessa viga será adicionada uma carga extra, na qual deverão ser feitos os cálculos necessários para dimensionar a quantidade de fibra para o reforço. Os cálculos serão feitos baseados na norma americana ACI 440.2R-08.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em uma viga de concreto fora acrescido uma carga adicional de 2,5 kN/m, sendo necessário o dimensionamento do reforço:

Dados adotados para a viga:

Largura da Viga: $b_w = 20\text{cm}$

Altura da Viga: $h = 40\text{cm}$

Comprimento da Viga: $L = 4,00\text{m}$

Carregamento adicional: $q = 15\text{ kN/m}$

Carregamento permanente: $g = 12\text{ kN/m}$

Resistência do concreto: $f_{ck} = 25\text{ Mpa}$

Altura útil: $d = 37\text{cm}$; $d' = 3\text{cm}$

Área de aço positivo: $A_s = 3 \text{ } \varnothing 12,5\text{mm} = 3,68\text{ cm}^2$

Área de aço negativa: $A'_s = 2 \text{ } \varnothing 8\text{mm} = 1,01\text{ cm}^2$

Resistência do aço: $f_{yk} = 500 \text{ Mpa}$

Elasticidade do aço: $E_s = 210 \text{ Gpa}$

Momento solicitante final: $M_{sd} = 60 \text{ kNm}$

Elasticidade da fibra de carbono: $E_{fc} = 228 \text{ Gpa}$

Com isso podemos calcular o peso próprio da viga, que deve ser considerado:

$$P_p = b_w \cdot h \cdot \gamma_{C.A.} = 0,2 \cdot 0,4 \cdot 25 = 2 \text{ kN/m}$$

Com o peso próprio da viga calculado, podemos calcular o peso (carga) total da viga:

$$P = q + g + p_p = 15 + 12 + 2 + 10^* = 39 \text{ kN/m}$$

*Carga adicional de 2,5 kN/m multiplicado por 4,00m da viga.

Uma vez calculada a carga total da viga devemos calcular o fletor dessa viga:

$$M_{kg0} = (q \cdot L^2) / 8 = (39 \cdot 4^2) / 8 = 78 \text{ kN.m}$$

Com isso é possível calcular a deformação na viga devida as cargas permanentes. Por se tratar de um esforço de menor intensidade, normalmente a viga está trabalhando no estágio 2 de deformação, para isso precisa-se dos seguintes valores:

Módulo de Elasticidade do concreto:

$$E_c = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

$$E_c = 5600 \cdot \sqrt{f_{25}}$$

$$E_c = 28.000 \text{ Mpa}$$

Coefficiente α_e , que relaciona os módulos de elasticidade do concreto e do aço:

$$\alpha_e = E_s / E_c = 210.000 / 28.000$$

$$\alpha_e = 7,5$$

Com esses valores é possível calcular a profundidade da linha neutra no estágio 2:

$$x_{II} = \frac{-[(\alpha_s - 1) \cdot A'_s + \alpha_s \cdot A_s] + \sqrt{[(\alpha_s - 1) \cdot A'_s + \alpha_s \cdot A_s]^2 - 2 \cdot b_w \cdot [-d' \cdot (\alpha_s - 1) \cdot A'_s - d \cdot \alpha_s \cdot A_s]}}{b_w}$$

$$x_{II} = \frac{-[(7,5 - 1) \cdot 1,01 + 7,5 \cdot 3,68] + \sqrt{[(7,5 - 1) \cdot 1,01 + 7,5 \cdot 3,68]^2 - 2 \cdot 20 \cdot [-3 \cdot (7,5 - 1) \cdot 1,01 - 37 \cdot 7,5 \cdot 3,68]}}{20}$$

$$x_{II} = 8,6 \text{ cm}$$

O próximo passo é calcular o momento de inércia da sessão fissurada:

$$I_{II} = \frac{b_w \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_s \cdot A_s \cdot (d - x_{II})^2 + \alpha_s \cdot A'_s \cdot (x_{II} - d')^2$$

$$I_{II} = \frac{20 \cdot 8,6^3}{3} + 7,5 \cdot 3,68 \cdot (37 - 8,6)^2 + 7,5 \cdot 1,01 \cdot (8,6 - 3)^2$$

$$I_{II} = 26.747 \text{ cm}^4$$

Após isso pode-se calcular a Tensão na armadura inferior:

$$\sigma_s = \frac{\alpha_s \cdot M_{k20} \cdot (d - x_{II})}{I_{II}}$$

$$\sigma_s = \frac{7,5 \cdot 7800 \cdot (37 - 8,6)}{26747}$$

$$\sigma_s = 620 \text{ Mpa}$$

Com a tensão na armadura inferior calculada, deve-se calcular a Deformação na armadura inferior:

$$\epsilon_{s,II} = \sigma_s / E_s$$

$$\epsilon_{s,II} = 620 / 210.000$$

$$\epsilon_{s,II} = 2,95 \%$$

Agora, pelo princípio das seções planas pode-se utilizar a semelhança de triângulos para achar os demais valores da deformação da seção:

Deformação na base inferior:

$$\epsilon_{0,II} = [\epsilon_{s,II} \cdot (h - x_{II})] / (d - x_{II})$$

$$\epsilon_{0,II} = [2,95 \cdot (40 - 8,6)] / (37 - 8,6)$$

$$\epsilon_{0,II} = 3,27 \%$$

Para achar o reforço mínimo necessário para a estrutura, é preciso que a seção reforçada esteja em equilíbrio com o momento solicitante. Dessa forma, se utilizar a equação de equilíbrio na altura da armadura inferior, chega-se a essa equação:

Equilíbrio de momentos em Fs:

$$F_{fc} = [M_{sd} - F_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) - F'_s \cdot (d - d')] / (h - d)$$

Mas, como não se sabe o valor da profundidade da linha neutra, fica impossível resolver essa equação isoladamente. Contudo, pode-se pegar uma nova equação aplicando o equilíbrio em outro ponto da seção. Se for aplicada a equação de equilíbrio de momentos no ponto de aplicação da resultante do concreto, tem-se a seguinte equação:

$$F_{fc} = [M_{sd} - F_s \cdot (d - 0,4 \cdot x) - F'_s \cdot (0,4 \cdot x - d')] / (h - 0,4 \cdot x)$$

Com os seguintes dados:

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b_w \cdot 0,85 \cdot f_{cd}$$

$$F_s = A_s \cdot f_{yd}$$

$$F's = A's.fyd$$

$$fcd = fck/\gamma_c$$

$$fyd = fyk/\gamma_s$$

$$\gamma_c = 1,4$$

$$\gamma_s = 1,15$$

Dispondo de duas equações, é necessário encontrar o valor de x que gere o mesmo valor para a resultante de força no reforço em ambas as equações, pois se a seção se encontra em equilíbrio, o valor da resultante será o mesmo em qualquer ponto que se calcule.

Como pode-se perceber, se trata de um processo iterativo, sendo necessário ir calculando diversos valores para x até encontrar o que satisfaz o equilíbrio na seção. Utilizando ajuda computacional esse problema fica bem mais simples, nesse exemplo o valor de x que gera o mesmo valor da resultante no reforço no equilíbrio de momentos vale: 8,13cm. Com isso é possível calcular:

Valor da resultante de concreto:

$$F_c = 0,8.x.b.w.0,85.fcd$$

$$F_c = 0,8x8,13x20x0,85x(25/1,4)$$

$$F_c = 197,4 \text{ kN}$$

Valor da resultante da armadura tracionada:

$$F_s = A_s.fyd$$

$$F_s = 3,68x(50/1,15)$$

$$F_s = 160 \text{ kN}$$

Valor da resultante na armadura comprimida:

$$F's = A's.fyd$$

$$F's = 1,01x(50/1,15)$$

$$F's = 43,9 \text{ kN}$$

Pelo equilíbrio de momentos no ponto da armadura positiva, tem-se a média dos dois pontos de equilíbrio:

$$F_{fc} = 97,6 \text{ kN}$$

Sabendo o valor da resultante que irá atuar no reforço, pode-se descobrir qual a área necessária para o reforço, para isso deve-se descobrir qual a deformação do reforço, como estamos calculando a estrutura em estado limite último, considera-se que o concreto trabalhará com o máximo de sua capacidade. Portanto apresentará uma deformação de 3,5 ‰, logo, por semelhança de triângulos, o valor de deformação da parte inferior da viga vale:

Deformação na base da viga:

$$\epsilon_0 = 3,5 \cdot ((h-x)/x)$$

$$\epsilon_0 = 3,5 \cdot ((40-8,13)/8,13)$$

$$\epsilon_0 = 13,72 \text{ ‰}$$

A deformação da fibra de carbono será a deformação final, menos a deformação que a viga já apresentava durante a aplicação do reforço, dessa forma ficamos com uma deformação de:

$$\epsilon_{fc} = \epsilon_0 - \epsilon_{0,II}$$

$$\epsilon_{fc} = 10,45 \text{ ‰}$$

Com isso pode-se encontrar qual a tensão atuante no reforço:

Tensão na fibra de carbono:

$$\sigma_{fc} = \epsilon_{fc} \cdot E_{fc}$$

$$\sigma_{fc} = 10,45 \times 228.000$$

$$\sigma_{fc} = 2.382,6 \text{ Mpa}$$

Por fim, com o valor da tensão pode-se descobrir a área mínima necessária para o reforço é:

Área mínima do reforço:

$$A_{fc} = F_{fc} / \sigma_{fc}$$

$$A_{fc} = 97,6 / 2.382,6$$

$$A_{fc} = 0,41 \text{ cm}^2$$

CONCLUSÃO

Ao se falar do reforço estrutural, é preciso se atentar principalmente ao projeto e às cargas já atuantes nas estruturas. Uma vez adicionada carga extra, seja por alteração da função da edificação, seja por reformas, se faz necessário o reforço estrutural.

Com o passar dos anos, a área da construção civil vem crescendo cada vez mais, resultando no aumento do número de construções e principalmente de reformas das construções mais antigas, onde muitas vezes se faz fundamental o reforço das estruturas.

A fibra de carbono não é um material tão utilizado ainda, por conta de seu custo elevado e por se tratar de um método relativamente novo, porém a cada dia que passa vem ganhando espaço no mercado devido ao seu alto desempenho para reforço estrutural.

Portanto, inicialmente foi utilizada uma viga hipotética a ser reforçada e depois submetemos uma carga adicional nessa viga. Com os resultados desses cálculos concluídos, foi feito os cálculos do reforço com CFC seguindo a norma americana ACI 440.2R-08. Com isso obteve-se os resultados apresentados, chegando numa área de reforço mínimo de 0,41cm² que representa a área necessária de reforço com fibra de carbono a ser aplicada na viga de concreto para assegurar suas propriedades estruturais.

AGRADECIMENTOS

Neste espaço, gostaríamos de agradecer a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão desse trabalho e à nossa formação acadêmica.

Gostaríamos de agradecer primeiramente nossos pais e familiares mais próximos, por todo apoio que nos deram.

A todos os professores com quem cruzamos ao longo da nossa trajetória, por todo conhecimento passado para nós e aos demais alunos do curso. Acreditamos muito em uma frase que diz “conhecimento deve ser passado e não guardado” e que através do poder do conhecimento podemos transformar a sociedade.



Aos nossos amigos que conhecemos durante a faculdade, que nos ajudaram tanto em trabalhos, estudos, pesquisas, conversas e demais atividades.

E ao nosso professor orientador Ricardo Simões e a professora Cândida Baptista, pela atenção, paciência e ensinamentos prestados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 6118 – **Projetos de Estruturas de Concreto** – Procedimento. Brasil, 2014.

ACI 440.2R-08 – **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. Farmington Hills, Michigan, 2008.

BREDA, Fabiane. **Fibra de Carbono**. 2018. Disponível em: <<https://www.portalsaofrancisco.com.br/quimica/fibra-de-carbono#:~:text=A%20fibra%20de%20carbono%20remonta,apenas%20fora%20de%20Cleveland%2C%20OH>> Acesso em: 28/03/2022.

BRITZKI, Luis. **Conhecendo os materiais – Fibra de carbono**. 2016. Disponível em: <<https://www.carbonstore.com.br/blog/conhecendo-os-materiais-fibra-de-carbono/>> Acesso em: 14/04/2022.

BRONZE, Ricardo Alves. **Estudo comparativo: Uso do sistema de fibras de carbono e sistema convencional para reforço de estruturas de concreto**. 2016. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10017651.pdf>> Acesso em: 23/05/2022.

CONSTRUCT. **5 motivos para optar pelo reforço estrutural com fibra de carbono**. 2018. Disponível em: <<https://constructapp.io/pt/reforco-estrutural-com-fibra-de-carbono/>> Acesso em: 14/04/2022.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Fibra de Carbono**. Disponível em:

<<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/fibra-carbono.htm>> Acesso em: 28/03/2022.

HAMANN, Renan. **Fibra de carbono: como é feito e como funciona esse material incrível.** 2017. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/quimica/76017-fibra-carbono-feito-funciona-material-incrivel.htm>> Acesso em: 06/04/2022.

INTECH ENGENHARIA. **Reforço Estrutural com compósito de fibra de carbono em estruturas de concreto armado.** Disponível em: <<https://www.intech.eng.br/reforco-estrutural-com-composito-de-fibra-de-carbono-em-estruturas-de-concreto-armado/>> Acesso em 14/04/2022.

JÚNIOR, Poli. **Quais os tipos de estrutura mais usados na construção civil? Conheça 4.** 2021. Disponível em: <https://polijunior.com.br/blog/tipos-de-estrutura/?gclid=EAIaIQobChMI8aH7-Pfi9wIVBMKRCh0zDQa2EAAYASAAEgJcGvD_BwE> Acesso em: 17/05/2022.

LEAL, Lilian Luna De Souza; FAGUNDES, Fabiano. **Reforço estrutural com fibra de carbono.** 2020. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/fibra-de-carbono#24-PRIMEIRAS-CONSIDERACOES>> Acesso em: 29/03/2022.

LORENZI, Bruna Rafaella Gonçalves de. **DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE UMA VIGA DE TRANSIÇÃO EM CONCRETO ARMADO COM FIBRAS DE CARBONO.** 2018. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/AGUARDAR_2020_1_-_DIMENSIONAMENTO_DO_REFOR%C3%87O_DE_UMA_VIGA_DE_TRANSI%C3%87%C3%83O_EM_CONCRETO_ARMADO_COM_FIBRAS_DE_CARBONO.pdf> Acesso em:26/05/2022.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibra de Carbono.** 2022. Disponível em: <<http://viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>> Acesso em: 15/05/2022.

MAZER, Wellington. **Fibra de carbono é usada para reforçar estruturas de concreto já existentes.** 2022. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/fibra-de-carbono-e-usada-para-reforcar-estruturas-de-concreto-ja-existent/12079>> Acesso em: 14/04/2022.

Parametrica Engenharia e arquitetura. **Reforço com Fibra de Carbono.** 2022. Disponível em: <<https://www.parametricaeng.com/reforco-com-fibra-de-carbono/>> Acesso em: 14/04/2022.

RISO, Bruno. **Comparação de reforço estrutural com chapa de aço colada e manta de fibra de carbono.** 2018. Disponível em: <<https://www.risoengenharia.com.br/comparacao-de-reforco-estrutural-com-chapa-de-aco-colada-e-manta-de-fibra-de-carbono/>>. Acesso em: 23/05/2022

RONCETTI, Leonardo. **Estudo comparativo entre métodos de dimensionamento de reforços de vigas de concreto armado à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono.** 2011. Disponível em: <<http://techcon.eng.br/wp-content/uploads/2016/01/Estudo-comparativo-entre-m%C3%A9todos-de-dimensionamento-de-refor%C3%A7os-de-vigas-de-concreto-armado-%C3%A0-flex%C3%A3o-com-pol%C3%ADmero-refor%C3%A7ado-com-fibra-de-carbono.pdf>> Acesso em: 22/05/2022.

SERPOL ENGENHARIA. **Fibra de carbono para reforço estrutural: quais são os benefícios.** 2019. Disponível em: <<https://serpolengenharia.com.br/2019/09/16/fibra-carbono-reforco-estrutural/>> Acesso em: 04/04/2022.



TEIJIN CARBON. **O que é fibra de carbono.** Disponível em:
<https://www.tejjincarbon.com/pt/produtos/o-que-e-fibra-de-carbono>> Acesso em:
11/05/2022.