

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
SILAS GERALDO DE SOUZA

REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COM SISTEMA
COMPOSTO DE FIBRAS DE CARBONO

FORMIGA – MG
2014

SILAS GERALDO DE SOUZA

REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COM SISTEMA
COMPOSTO DE FIBRAS DE CARBONO

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
do UNIFOR, como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Tiago de Moraes Faria Novais

S719 Souza, Silas Geraldo.
Reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de
fibras de carbono / Silas Geraldo de Souza. – 2014.
79 f.

Orientador: Tiago de Moraes Faria Novais.

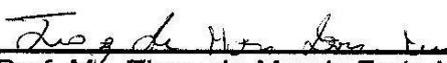
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Civil)-Centro Universitário de Formiga–UNIFOR, Formiga, 2014.

Silas Geraldo de Souza

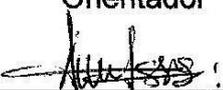
REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COM SISTEMA
COMPOSTO DE FIBRAS DE CARBONO

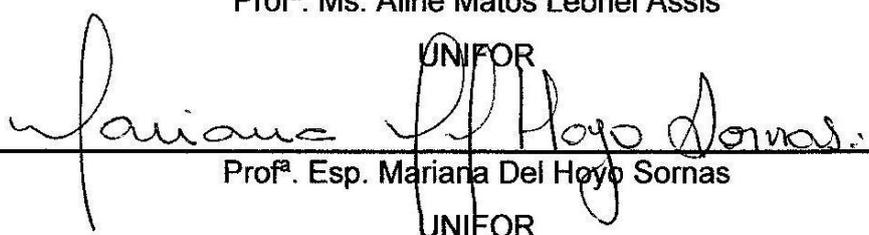
Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
do UNIFOR, como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Ms. Tiago de Moraes Faria Novais

Orientador


Profª. Ms. Aline Matos Leonel Assis


Profª. Esp. Mariana Del Hoyo Sornas

UNIFOR

Formiga, 10 de novembro de 2014.

Dedicado aos meus pais, José Geraldo de
Souza e Rosilene Fernandes Lopes
resumidamente por fazerem parte de minha
vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde, força e coragem concedidos nas derrotas e vitórias ocorridas durante a realização deste trabalho e em toda minha vida.

Ao meu pai e minha mãe, pelo incentivo nos estudos fornecido antes mesmo do início do processo de graduação e pela ajuda constante durante todos estes anos.

Ao Prof. Ms. Tiago de Moraes Faria Novais, pela paciência, dedicação e atenção prestadas na realização deste trabalho e pelos conhecimentos transmitidos fundamentais para a minha formação acadêmica.

Aos meus familiares, irmãs, tios e primos pelo apoio e por sempre estarem presentes em todos os momentos de minha vida. Em especial a meus avós pela contribuição na formação do meu caráter.

A todos meus amigos, pelos momentos de descontração que tornaram menos cansativo a realização deste trabalho e os vários anos de vida acadêmica.

A meus colegas de curso que enfrentaram todas as dificuldades impostas no processo de graduação junto a mim. Em especial aos meus amigos Jorge Henrique Felipe Santana e Paulo Henrique M. de Oliveira.

A minha namorada Fernanda Borges pela ajuda, carinho, atenção e paciência que nunca faltaram em todos estes anos de estudo.

As empresas Britamil e GR Brasil pela fundamental contribuição na execução deste trabalho. Ao proprietário e funcionários da Dicasa Engenharia pelo conhecimento prático transmitido, contribuindo diretamente na minha formação profissional.

Enfim agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho e durante todo o processo de graduação.

RESUMO

Este trabalho apresenta o método de reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono, através da bibliografia e estudos acerca desta forma de melhoramento da capacidade resistente e da durabilidade de tais estruturas. Para comprovar e enfatizar o desempenho do reforço com sistema composto de fibra de carbono o trabalho apresenta os resultados de teste comparativo realizado, no qual corpos de prova de concreto sem armadura foram submetidos a ensaios de carregamento axial com e sem o reforço do sistema composto de fibras de carbono, deste modo os resultados indicam o ganho de resistência à compressão fornecida por este método de reforço. Fatores como o crescimento constante das cidades que acaba exigindo a adaptação de construções de concreto armado com o período de vida útil ultrapassado à novas formas de uso, aumento no carregamento da estrutura, patologias, danos causados por acidentes e perda de resistência devida a má execução destas, geram a falta de capacidade portante de tais estruturas, tornando o seu uso inseguro. Deste modo o método de reforço de estruturas de concreto armado através de sistema composto de fibras de carbono tende a ganhar espaço na área de engenharia civil, devida sua fácil execução, leveza do sistema como um todo, grande aumento da rigidez da estrutura e por não modificar a essência arquitetônica da obra. Já métodos tradicionais como o confinamento por outra armadura de aço e posterior aumento da seção de concreto e a inserção de perfis de aço, se contrapõe as características arquitetônicas originais da obra e no que diz respeito ao comportamento estrutural, gera o aumento de cargas a serem resistidas pela estrutura como um todo. Com isso o aprofundamento dos conhecimentos acerca deste método que ainda é pouco conhecido pela comunidade acadêmica nacional gera o desenvolvimento do interesse em novas pesquisas e estudos como este trabalho aqui apresentado.

Palavras-chave: Concreto armado. Reforço estrutural. Sistema composto de fibra de carbono.

ABSTRACT

This work presents the method of strengthening of reinforced concrete structures with system composed of carbon fiber, through literature and studies about this way to improve the capacity and rugged durability of such structures. To demonstrate and emphasize the performance of reinforcement with system composed of carbon fiber the work presents the result of comparative test carried out, in which specimens of concrete without armour were subjected to axial loading with and without the reinforcement of the compound system carbon fibers, thereby indicating the results of compressive strength gain provided by this reinforcement method. Factors such as the steady growth of cities that just requiring the adaptation of the period armed with outdated life to new forms of use, increasing the loading of the structure, disease, accident damage concrete buildings and loss of strength due to poor implementation of these generate a lack of bearing capacity of such structures, making it unsafe for use. Thus the method of reinforcement of reinforced concrete using a system composed of carbon fibers tends to gain space in the area of civil engineering, due its easy implementation, the lightness of the system as a whole, large increase of the rigidity of the structure and does not modify the architectural essence of the work. Already traditional methods as confining another by steel reinforcement and concrete further increased section and the insertion of steel profiles opposes the original architectural features of the work and with regard to the structural behavior generates higher loads to be resisted by the structure as a whole. With this increasing knowledge about this method that is little known by the national academic community generates interest in the development of new research and studies like this work presented here.

Keywords: Reinforced concrete. Structural reinforcement. System composed of carbon fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de tensões em pilares reforçados.....	35
Figura 2 - Reforço em toda a seção transversal	36
Figura 3 - Reforço tipo U	37
Figura 4 - Reforço lateral.....	37
Figura 5 - Areia utilizada.....	46
Figura 6 - Brita utilizada.....	47
Figura 7 – Cimento utilizado.....	47
Figura 8 – Água utilizada	48
Figura 9 – Manta de fibra de carbono utilizada.....	48
Figura 10 – Resina saturante utilizada.	49
Figura 11 – Massa regularizadora utilizada.	50
Figura 12 – Imprimador utilizado.	51
Figura 13 – Betoneira utilizada.....	53
Figura 14 – Equipamentos utilizados no teste de	53
Figura 15 – Moldes preenchidos.....	54
Figura 16 – Preparação do substrato de concreto.....	55
Figura 17 – Corpos de prova imprimados.....	55
Figura 18 – Aplicação da massa regularizadora.....	56
Figura 19 – Impregnação com resina saturante	57
Figura 20 – Adesão da manta de fibra de carbono	57
Figura 21 – Corpo de prova reforçado.....	58
Figura 22 – Ferramentas e equipamentos utilizados.....	59
Figura 23 – Prensa hidráulica	60
Figura 24 – Ensaio de abatimento	61
Figura 25 – CP 3 Rompido.....	62
Figura 26 – Leitura de carregamento do CP 3.....	62
Figura 27 - CP 8 Rompido.....	63
Figura 28 – Leitura de carregamento do CP 8.....	64
Figura 29 – CP 11 Rompido.....	65
Figura 30 – Leitura de carregamento do CP 11.....	65

Gráfico 1 – Variação de resistência do grupo não reforçado	65
Gráfico 2 – Variação de resistência do grupo reforçado com uma camada do sistema CFC	65
Gráfico 3 – Variação de resistência do grupo reforçado com duas camadas do sistema CFC	66
Gráfico 4 – Comparativo de variação da resistência	66
Gráfico 5 – Variação da resistência média	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço para concreto armado	29
Tabela 2 – Classe de agressividade do ambiente	30
Tabela 3 – Qualidade do concreto a ser utilizado.	31
Tabela 4 – Cobrimento nominal mínimo.....	31
Tabela 5 – Características técnicas da manta de fibra.....	49
Tabela 6 – Características técnicas da resina saturante.	49
Tabela 7 – Características técnicas da massa regularizadora.	50
Tabela 8 – Características técnicas do imprimador.	51
Tabela 9 – Ensaio dos corpos de prova sem reforço com CFC	62
Tabela 10 – Ensaio dos corpos de prova reforçados com	63
Tabela 11 – Ensaio dos corpos de prova reforçados com	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 JUSTIFICATIVA.....	15
4 HIPÓTESE	15
5 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
5.1 Concreto armado.....	16
5.1.1 Cimento Portland.....	17
5.1.1.1 Tipos de cimento Portland	19
5.1.2 Confeção do concreto estrutural	20
5.1.3 Dosagem	21
5.1.4 Relação Água/Cimento	23
5.1.5 Interação Concreto/Armadura	24
5.1.6 Dimensionamento de peças	25
5.1.6.1 Princípios básicos.....	26
5.1.6.2 Cobrimento das armaduras	30
5.2 Reforço estrutural com sistema Composto de Fibras de Carbono (CFC)....	32
5.2.1 Componentes do sistema.....	33
5.2.3 Orientação das fibras segundo função estrutural.....	34
5.2.4 Conceitos básicos de dimensionamento	38
5.2.5 Comportamento do CFC em ambientes agressivos.....	40
5.2.6 Procedimentos de execução do reforço de CFC na peça de concreto armado	42
5.2.6.1 Controle e recuperação do concreto	43
5.2.6.2 Preparo da peça portante a ser reforçada.....	43

5.2.6.3 Tratamento da superfície de contato	44
5.2.6.4 Manuseio e saturação do elemento estrutural fibra de carbono.....	44
5.2.6.5 Camada final de saturação	45
6 MATERIAIS E MÉTODOS	46
6.1 Materiais utilizados	46
6.2 Métodos de fabricação dos corpos de prova, reforço e ensaios utilizados	52
6.2.1 Procedimentos de fabricação, moldagem e cura dos corpos de prova	52
6.2.2 Execução do reforço com o sistema CFC e ensaios adotados.....	54
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
8 CONCLUSÃO	69
REFERENCIAS.....	71
ANEXO A – Exemplo de obras no Brasil reforçadas com o sistema composto de fibras de carbono	74

1 INTRODUÇÃO

O crescimento constante das grandes cidades obriga os estabelecimentos existentes a se adequarem a necessidade de novas formas para utilização destes, o que em muita das vezes gera maior carregamento à estrutura existente. A redução da capacidade resistente de cargas devido a patologias, má execução dos serviços com concreto armado, até mesmo acidentes que comprometam a estrutura e o fato de que a vida útil de muitas edificações já foi alcançada, leva a necessidade de reforçar as peças portantes que constituem tais estruturas. O seguinte estudo mostra uma solução cada vez mais adotada na área de reformas e reparos de edificações: o reforço de estruturas de concreto armado com compostos de fibra de carbono.

A técnica de reforço em questão se destaca por apresentar peso próprio baixo o que não gera o aumento do carregamento por cargas permanentes, além de não modificar significativamente a harmonia arquitetônica das peças as quais são aplicadas com o ambiente em que se encontram. Os filamentos de fibra de carbono proporcionam além do aumento na capacidade resistentes de todos os esforços presentes em estruturas de concreto armado, o isolamento da peça reforçada, impedindo a ação de agentes agressivos presentes no ambiente garantindo assim, o aumento na durabilidade da estrutura.

Vários fatores geram receio em relação ao uso deste método no país, entre estes a facilidade do processo executivo que vagamente se resume em limpar a peça que será reforçada e colar os filamentos de fibra de carbono sobre esta, e se falando em filamentos de fibra de carbono, a aparente fragilidade da manta destes é mais um fator que gera desconfiança no seu emprego como material com função estrutural. A falta de normas e estudos em âmbito nacional dificultam a adoção deste método como ferramenta para os engenheiros e profissionais de engenharia civil, sendo assim, o seguinte trabalho visa a revisão da bibliografia existente acerca deste assunto, para apresentar e comprovar a eficácia deste sistema de reforço.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Aprofundar o conhecimento sobre a técnica de reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono e testar o seu desempenho através de ensaios de compressão em corpos de prova reforçados.

2.2 Objetivos específicos

Rever a bibliografia existente acerca do reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono, e apresentar a sua utilização como solução das seguintes circunstâncias que podem ocorrer em estruturas de concreto armado:

- Deterioração do concreto e ou da armadura;
- Aumento de carregamento;
- Má execução dos serviços de concretagem e armação.

3 JUSTIFICATIVA

Pelo fato do método de reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono ainda não ser um assunto abordado na área acadêmica no país e por si tratar de um método que vem ganhando destaque na área de reforço estrutural devida sua eficiência comprovada, este se tornou um assunto que desperta a curiosidade dos profissionais da área.

Devido a tais fatores o tema deste trabalho tem o foco em apresentar esta técnica de reforço estrutural como uma ferramenta que pode solucionar vários problemas decorrentes de má execução, patologias ou aumento do carregamento das estruturas de concreto armado, garantindo a estabilidade estrutural e mantendo as características arquitetônicas da obra como um todo. Sendo assim tal técnica provavelmente com o passar do tempo terá um papel de grande importância na área da engenharia civil, exigindo o conhecimento desta pelos profissionais técnicos deste setor.

4 HIPÓTESE

Comprovação da existência de estudos e bibliografias suficientes para se tornar possível o dimensionamento e emprego da técnica de reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono, tendo comprovada a sua contribuição no aumento da capacidade de carregamento e recuperação de estruturas através de ensaios e das inúmeras utilizações existentes deste em todo o mundo.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 Concreto armado

As primeiras obras de arte constituídas por estruturas rígidas que foram construídas pelo ser humano, tinham como principal material para criação de peças com função estrutural a rocha, material este que apresenta uma resistência a compressão consideravelmente boa e estável. Egípcios, gregos, romanos e outros povos antigos empregavam este material em várias construções como templos, moradias e obras de arte, mas este apresentava grandes problemas quando usado em peças que eram solicitadas por esforços de tração, causando o aparecimento de fissuras e até mesmo a ruína da obra. A solução inicial usada para combater tais efeitos foi a utilização de peças em forma de arco, que transforma os efeitos dos esforços de tração em compressão, devido ao momento resultante do carregamento destas peças ter sua proporção de efeito parabólica sobre esta. Com o descobrimento do concreto como composto para estruturas de obras, o problema era praticamente o mesmo das rochas sob esforços de tração, iniciando assim, a utilização do aço que resiste perfeitamente a tração em conjunto com o concreto responsável por anular os efeitos da compressão, criando o composto chamado atualmente de concreto armado. (CAMPOS BOTELHO; MARCHETTI, 2010).

No contexto que envolve construções civis, várias técnicas e materiais são utilizados para sua execução, dentre estes o concreto armado se destaca principalmente na confecção de peças com função estrutural. Composto muito utilizado em edificações no Brasil e em boa parte do mundo devido à abundância de matéria prima e simplicidade na execução se comparado a estruturas de aço que requer mão de obra especializada e alto custo de materiais. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2004).

De acordo com Borges (2010), o composto se divide em duas partes, o concreto formado pela mistura dos agregados graúdo e miúdo com aglomerante hidráulico usualmente cimento portland e a armadura feita com barras de aço dobradas e dispostas conforme função estrutural. Posteriormente estas partes serão tratadas apresentando todas as suas propriedades que envolvem seu dimensionamento para estruturas de concreto armado.

5.1.1 Cimento Portland

De acordo com Ribeiro, Silva Pinto e Starling (2011), o cimento Portland é o aglomerante hidráulico mais utilizado para confecção do concreto devido sua capacidade de chegar a elevados índices de resistência mecânica ao longo de sua vida útil e facilidade para ser moldado quando homogeneizado com a adição de água. É constituído principalmente de aluminatos e silicatos de cálcio, além de receber a adição de outros componentes como escória obtida no processo de produção de ferro-gusa que por possuir características de ligante hidráulico melhora a durabilidade e resistência final do cimento; a pozolana é usada por ser um material inerte de baixo custo e melhorar o desempenho dos compostos de cimento em ambientes agressivos aumentando sua durabilidade e diminuindo o calor de hidratação devida à presença de sílica e alumina no caso de pozolana natural; o fíler que auxilia na diminuição da permeabilidade e capilaridade dos compostos de cimento além de melhorar a trabalhabilidade destes. Este produto recebe a denominação de Portland devido à pedra calcária denominada assim, utilizada na fabricação de cimento em Dorset, na Inglaterra, muito semelhante ao produto obtido no Brasil.

Segundo Bauer (2011), dentre os constituintes básicos que compõem o cimento Portland, estão a cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) além de outros em pequenas quantidades como o anidrido sulfúrico (SO_3) que reage retardando a pega do cimento, e impurezas chamadas de álcalis do cimento, que são o óxido de potássio (Na_2O) e o óxido de sódio (K_2O), além do óxido de titânio (TiO_2) e outras substâncias em porcentagens insignificantes. O processo utilizado atualmente para fabricação do cimento é dividido em três partes seguintes:

- 1ª Parte: extração das matérias-primas citadas acima, encontradas em jazidas de rocha calcária ou de argila. Após a extração da jazida por detonação o material é transportado para os britadores e em seguida é homogeneizado em silos;
- 2ª Parte: a segunda etapa é a produção do clínquer que é o composto principal do cimento Portland, que começa pela moagem da matéria-prima dando origem ao pó conhecido como cru, pó este que é retirado da moagem e pré-aquecido por pulverização. Em seguida o material cru passa pelo forno rotativo aquecido a uma temperatura em torno de

1500°C e logo após é resfriado bruscamente dando origem a pedregulhos arredondados chamados de clínquer;

- 3ª Parte: a última etapa do processo é a moagem do clínquer juntamente com a adição de gesso para auxiliar no controle do tempo de pega do cimento e também a adição de escória, pozolana ou filer conforme citado anteriormente, finalizando assim o processo de produção dos vários tipos de cimento Portland comercializados atualmente.

As características que o cimento Portland apresenta após sua fabricação interferem diretamente no seu desempenho durante o uso, como o processo final de moagem do clínquer com o gesso e as adições que define a finura do cimento medida em laboratório com a peneira ABNT 0,075 mm e influencia diretamente na resistência, impermeabilidade, trabalhabilidade e exsudação de argamassas e concretos. Quanto menor os grãos do cimento usado, ele apresentara maiores níveis de resistência nas primeiras idades, trabalhabilidade e impermeabilidade, e menor exsudação que por facilitar a segregação da pasta de cimento dos agregados do concreto, prejudica a resistência final da peça como um todo. (RIBEIRO; SILVA PINTO; STARLING, 2011).

O tempo de pega pode ser definido segundo Bauer (2011), como o período em que se dá início a reação da água com o cimento até o ponto que fica inviável o manuseio da pasta para realização dos trabalhos. Após a adição de água em pastas, concretos e argamassas, se inicia a hidratação do cimento que leva a aglutinação e posterior floculação dos grãos deste, o que conduz a criação de uma estrutura rígida. O tempo necessário para se iniciar a reação que da origem aglutinação, é o mesmo tempo que se tem para manuseio do composto que leva a pasta, após este período trabalhos de lançamento e nova mistura do composto afetaram diretamente suas propriedades mecânicas de resistência e aderência. Quaisquer que sejam as modificações no tempo de pega para realização dos trabalhos, devem ser realizadas com a adição de retardadores com origem de açúcares ordinários, celulose e outros produtos orgânicos e aceleradores como o silicato de sódio e o cloreto de cálcio. Tais aditivos, dosados adequadamente, não interferem no desempenho final do composto.

Ainda de acordo com Bauer (2011), outra característica de relevante importância é o calor de hidratação. Com o decorrer da hidratação do cimento são

liberados níveis consideráveis de energia térmica, que variam principalmente com a quantidade de aluminatos tricálcicos e silicato presente no cimento e com a sua finura. Em peças de pequenos volumes tal fenômeno não afetara a estrutura do composto, mas no emprego deste para construção de peças com grandes volumes, após resfriamento do composto ocorre o aparecimento de trincas por contração.

Com elevadas proporções de cal livre e magnésia na composição do cimento Portland de acordo com Ribeiro, Silva Pinto e Starling (2011), ocorre o fenômeno da expansibilidade. Ao fim do endurecimento do composto, a hidratação das partículas da cal e da magnésia causa a expansão interna destas, o que exerce tensões na estrutura do composto levando ao aparecimento de fissuras e desagregação dos materiais que constituem o composto em certos pontos.

5.1.1.1 Tipos de cimento Portland

Existem vários tipos de cimento Portland no mercado atualmente, sendo que cada um deles apresenta um desempenho característico aos esforços e agressões sofridas durante a vida útil da obra. A seguir são apresentados os principais tipos de cimento Portland usados e suas características de acordo com Bauer (2011):

- Cimento tipo 1: conhecido pela sigla CP-I, tem seu uso restrito a locais sem exposição a agressões químicas principalmente de sulfatos, é o cimento puro com adição apenas do gesso para retardar a pega;
- Cimento tipo 2: recebe o nome de modificado ou composto por receber a adição de compostos como escória (cimento CP-II-E), pozolana (CP-II-Z) ou fíler (CP-II-F), com intuito principal de moderar o calor de hidratação. É utilizado em obras de porte médio em geral;
- Cimento tipo 3: proporciona altos valores de resistência inicial com baixo calor de hidratação devido a grande proporção de escória e silicato tricálcico (C_3S) e maior finura, conhecido como CP-III ou cimento Portland de alto forno. Utilizado em estruturas de concreto em geral, argamassas, pisos de indústrias, ambientes com exposição à de sulfatos e fabricação de artefatos de fibrocimento;
- Cimento tipo 4: devido a redução na proporção de aluminato tricálcico (C_3A) e silicato tricálcico (C_3S) apresenta baixo calor de hidratação, é

utilizado principalmente em construções de grande porte e ambientes agressivos, conhecido pela sigla CP-IV;

- Cimento tipo 5: produto com menor proporção de aluminato tricálcico (C_3A), o que agrega a este maior resistência a ambientes expostos a sulfatos e quando as proporções de silicato tricálcico (C_3S) são aumentadas. Este apresenta maior resistência inicial, é comercializado com a sigla CP-V, empregado na produção de pré-moldados de concreto e em obras com a necessidade de alta resistência a curto tempo.

5.1.2 Confeção do concreto estrutural

A preparação do concreto se dá pela mistura entre os agregados, aglomerante hidráulico e água, com suas características e quantidades definidas por ensaios de dosagem, a fim de se obter as propriedades esperadas durante a vida útil da edificação. Tal mistura pode ser realizada de duas formas: manual e mecânica.

- Mistura manual: de acordo com Bauer (2011), o uso de concreto de mistura manual é aceitável apenas em obras de pequeno porte, devida a variância no grau de homogeneidade entre os traços confeccionados. Tal mistura deve ser realizada com todos os componentes a seco até que se garanta um aspecto uniforme a todo o traço, logo após adiciona-se água na proporção obtida em estudos reconhecidos e é realizada novamente a mistura para se alcançar a homogeneização completa do concreto. Tal método processo é estabelecido na NBR 6180/80 que ainda estabelece a mistura de traços com no máximo de 100 kg de cimento por vez;
- Mistura mecânica: realizada por meio de betoneiras. Neste procedimento de mistura, ainda segundo Bauer (2011), para se obter maior facilidade na execução e garantir a uniformidade do traço, a disposição da sequência na colocação dos componentes no tambor da betoneira deve seguir a seguinte ordem: primeiro se coloca a água e o agregado graúdo a fim de se garantir a total limpeza da superfície do tambor, em seguida adiciona-se o cimento que, juntamente com a água

e o agregado graúdo, será mais bem distribuído no volume final de concreto devido ao contato com o agregado graúdo. Por fim o agregado miúdo é adicionado. Desta forma, evita-se o acúmulo de materiais impregnados na superfície do tambor entre a mistura de um traço e outro. O tempo de mistura para betoneiras estacionárias de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua NBR 12655/1996 deve ser de 60 segundos no mínimo e conforme se aumenta a capacidade do dispositivo de mistura, se acrescenta 15 segundos por metro cúbico de aumento, a diminuição deste tempo só deve ser realizada se verificada a completa homogeneização dos materiais dispostos;

- Concreto misturado em central: o popularmente conhecido concreto usinado, de acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas (1984), tem sua mistura realizada em equipamento estacionário na central, ou em caminhões betoneira. As características de resistência a compressão, dimensão do agregado graúdo e abatimento, estabelecidas pelo contratante do serviço, ficam sobre total responsabilidade da empresa contratada. O ensaio de abatimento (*slump test*) e a retirada de corpos de prova para testes de compressão devem ser realizados a fim de se garantir a qualidade e características do produto solicitadas pelo contratante do serviço.

5.1.3 Dosagem

A etapa de estudo da dosagem do concreto, segundo Leonhardt e Mönning (2008), é de suma importância para que seja garantido o desempenho deste durante a execução do serviço devida a trabalhabilidade e na vida útil da obra devida a resistência do concreto endurecido. As proporções de cimento, agregado graúdo e miúdo e água definem o desempenho do traço estudado.

Certos critérios devem ser analisados no procedimento de estudo de dosagem do traço de concreto a ser utilizado. De acordo com Bauer (2011), deve-se levar em conta a resistência esperada, a retração ocorrida, estanqueidade e trabalhabilidade. Para se definir os valores e desempenho esperados dos critérios citados, deve-se ter o conhecimento do projeto a qual será aplicado este concreto,

as formas de produção disponíveis para este e os materiais a que se tem acesso na região onde a obra será executada.

Para estudos de dosagem são usados os métodos racional ou experimental e dosagem empírica, estabelecidos de acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas (1996) da seguinte forma:

- Dosagem racional ou experimental: o traço dos concretos de classe superior a C15 devem ser estudado e definido com antecedência ao início de seu emprego em obra e deverá ser realizado novamente no caso de mudanças no tipo e marca do cimento utilizado e nas características dos agregados. Os estudos e ensaios devem ser realizados com os mesmos materiais que serão utilizados no decorrer da execução de serviços de concretagem na obra;
- Dosagem empírica: a utilização deste método de estudo para dosagem, só poderá ser utilizada na execução de peças as quais foram estabelecidas o uso de concreto da classe C10, com valores respeitando a proporção mínima de consumo de cimento na ordem 300 kg por metro cúbico de concreto.

Após definido o traço para estudo são realizados os testes de resistência à compressão de acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas (2007), em no mínimo 20 corpos de prova extraídos, com os dados dos testes em mãos, define-se o desvio-padrão deste traço utilizado para cálculo da resistência deste pela seguinte equação:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d$$

onde:

f_{cj} = resistência á compressão média do concreto estudado após j dias (em megapascals);

f_{ck} = resistência á compressão esperada para a classe do concreto estudado (em megapascals);

S_d = desvio-padrão do traço da dosagem em estudo (em megapascals).

O desvio-padrão definido não deve ser inferior a 2 megapascals.

5.1.4 Relação Água/Cimento

Um fator que deve ser analisado cautelosamente durante estudos dos concretos é a relação água/cimento presente neste. De acordo com Leonhardt e Mönning (2008), certa proporção da água adicionada é consumida durante a pega (cerca de 15% do peso de cimento) e o consumo de outra parte fica a cargo de garantir a completa hidratação dos grãos de cimento (entorno de 40% do peso de cimento). Há também uma pequena proporção que ajuda a dar maior trabalhabilidade ao composto. O aumento no teor de água presente em concretos á níveis que a quantidade desta não é totalmente consumida na reação de hidratação e pega do cimento leva a diminuição da resistência final e o módulo de elasticidade do concreto, além de aumentar consideravelmente a retração e a porosidade deste.

A retração pode ser definida pela variação volumétrica da peça de concreto em questão, causada pelo consumo de água presente no composto durante o processo de hidratação dos grãos de cimento. Em traços com altos índices de relação água/cimento, a perda de volume da peça exerce tensões internas no concreto que inicialmente são inibidas pelas formas da peça, tais tensões acabam por gerar esforços de tração que não são resistidos pelo concreto e levam ao aparecimento de pequenas fissuras na peça, diminuindo sua resistência e durabilidade. (FUSCO, 2008).

Ainda de acordo com Fusco (2008), a porosidade do concreto é um fator que deve ser analisado cautelosamente, pois quando este tem muitos poros tende a prejudicar consideravelmente a durabilidade e conseqüentemente a resistência da peça de concreto armado como um todo. Os poros presentes no concreto são de quatro tipos distintos, os poros de compactação, de incorporação do ar, capilares e os decorrentes do gel de cimento, entretanto o fator água/cimento influencia diretamente apenas na proporção dos dois últimos. O excesso de água de amassamento presente no traço de concreto com o decorrer do processo de cura é evaporado formando assim uma rede de poros chamada de capilares, que acabam deixando toda a superfície do elemento de concreto armado vulnerável a ação de agressões ambientais e a carbonatação devida à ação direta do gás carbônico. A retração causada durante o processo de hidratação do cimento gera o aparecimento de micro poros, definidos como poros do gel de cimento, que por sua pequena dimensão e por serem isolados uns dos outros não afetam relevantemente o

desempenho do concreto. Os poros devidos a incorporação de ar gerado durante a mistura do concreto, e os poros de compactação causados pelas vibrações durante o transporte e pelo atrito do concreto com a superfície da forma durante seu lançamento, também são responsáveis da perda de durabilidade e resistência do concreto em proporções menores que as causadas pelo excesso de água e conseqüentemente aparição dos poros capilares.

Durante a produção do concreto, segundo Rossignolo (2009), o teor de água presente nos agregados deve ser cautelosamente observado e, se comprovado a presença deste em níveis consideráveis, deve-se diminuir a quantidade de água adicionada neste traço, a fim de se garantir o desempenho final esperado para tal concreto.

A relação água/cimento, de acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2004), é responsável direta pela consistência e trabalhabilidade do concreto fresco, para determinação do grau destes parâmetros é utilizado o ensaio de abatimento chamado de *slump-test* normatizado pela Associação Brasileira de Normas técnicas em sua NBR NM 67:1998. Este teste é uma ferramenta de grande importância durante os trabalhos de concretagem. Quanto maior o abatimento obtido no ensaio, melhor é a trabalhabilidade deste concreto, mas em contra partida o aumento de tais valores realizado apenas com o acréscimo de água durante a mistura, acaba diminuindo a resistência e a durabilidade do concreto. Técnicas como o uso de aditivos de aumento de fluidez e o aumento da proporção de cimento e água no traço, são as maneiras corretas para o melhoramento da trabalhabilidade do concreto sem prejudicar o desempenho esperado deste. Sendo assim é plausível considerar que um concreto com consumo de cimento e abatimento definidos para um traço padrão, sob a hipótese de aumento apenas do abatimento deste com a utilização de maior fator água/cimento, fica inviável o seu emprego na concretagem de peças com função estrutural.

5.1.5 Interação Concreto/Armadura

A eficácia das estruturas de concreto armado é conseguida pela a perfeita aderência entre o concreto e o aço, segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2004), os esforços de tração resistidos pelas estruturas de concreto armado como um todo só é possível devido à interação dos seus componentes que resulta na aderência

destes, sem tal fenômeno a tração exercida sobre a estrutura não seria repassada do concreto para as barras de aço que sofreriam um escorregamento no interior da peça portante. Como é de conhecimento nas estruturas de concreto armado, o concreto tem papel principal de resistir os esforços de compressão sofridos pela estrutura, sua resistência a tração é muito pequena se comparada ao aço. Deste modo sem a aderência o escorregamento das barras de aço levaria ao aparecimento de fissuras na peça e até ao colapso da estrutura como um todo.

De acordo com Leonhardt e Mönning (2008), a aderência entre o concreto e a armadura se ocorre por três tipos:

- Adesão: proveniente das propriedades de aderência ou colagem do cimento utilizado no concreto com a superfície das barras de aço, o que garante a primeira interação entre os dois materiais mas não oferece a aderência suficiente para que a estrutura suporte os esforços de tração a ela exercidos, pois em movimentações providas pela retração ou expansão do concreto esta ligação pode ser rompida;
- Atrito: ocorre devido às pressões exercidas pelo concreto na superfície da armadura, o aumento de tais pressões proporcionalmente aumenta a força de atrito entre os elementos;
- Engrenamento: as nervuras ou saliências existentes nas barras de aço são preenchidas pelo concreto, quando a barra sofre ações que tendam a levar ao escorregamento desta, o volume de concreto contido nos intervalos das nervuras é submetido a força de compressão o que aumenta a pressão entre os dois elementos e conseqüentemente a aderência destes.

5.1.6 Dimensionamento de peças

As peças portantes das estruturas de concreto armado apresentam funções diferentes umas das outras, e em cada uma destas o aço e concreto são empregados afim de que suas propriedades de resistência ao diversos esforços solicitados às peças garantam a estabilidade estrutural da edificação durante a vida útil esperada para esta. Basicamente o concreto tem como função estrutural resistir os esforços solicitantes de compressão e fica a cargo do aço resistir os esforços solicitantes de tração, visto que cada um destes possui propriedades características

que os possibilitam absorver tais esforços provenientes das cargas permanentes e variáveis de cada edificação. (BORGES, 2010).

Sendo assim o primeiro passo para se realizar o dimensionamento de estruturas de concreto armado é o levantamento das cargas atuantes em cada peça com função estrutural. Entretanto segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2004), fatores durante a execução da obra tais como: uso de materiais que por algum motivo não tenham a resistência esperada em cálculo, imperfeições na geometria da peça e erro na locação desta; e na concepção dos projetos junto a imprecisão dos cálculos e ensaios, torna-se inviável considerar uma estrutura totalmente segura, sendo assim indispensável a utilização de fatores de segurança para minimizar o máximo possível a perda da estabilidade estrutural das edificações em concreto armado devido a estes fatores.

5.1.6.1 Princípios básicos

Como citado anteriormente em estruturas de concreto armado, de acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2004), a aderência entre o concreto e o aço garantem o trabalho solidário destes, visto que o concreto por si só apresenta pouca resistência a esforços de tração, e o aço em barras de pequenos diâmetros como é utilizado em estruturas de concreto armado não apresenta estabilidade suficiente para resistir os esforços de compressão.

Segundo Borges (2010), o concreto apresenta resistência característica à compressão denominada *fck*, que é obtido através de ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos com altura sendo o dobro do diâmetro, sendo que o mais utilizado é o de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, este deve ser moldado com três camadas iguais adensadas com 25 golpes cada, usando uma haste de aço com diâmetro de 16 mm e comprimento entre 6 e 8 cm conforme regulamenta a Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua NBR 5738, o ensaio de compressão do concreto é realizado de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua NBR 5739, utiliza-se uma prensa para a aplicação contínua do carregamento sobre o corpo de prova, para garantir a eficácia do ensaio deve-se posicionar o corpo de prova com o eixo vertical coincidindo com o eixo de aplicação da carga, após o rompimento deste realiza-se a leitura do carregamento

exercido até este ponto e através da equação abaixo é obtida a resistência de tal amostra:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2}$$

onde:

f_c = resistência a compressão (megapascals);

F = força resistida até a ruptura (newtons);

D = diâmetro do corpo de prova (milímetros).

Com posse de dados de rompimentos de determinado número de corpos de prova de um mesmo lote de acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2004), é possível se determinar a resistência característica do concreto (f_{ck}) deste lote de amostragens, tal valor será utilizado para o dimensionamento das peças portantes de concreto armado. A equação abaixo é utilizada para obter o valor de f_{ck} :

$$f_{ck} = f_{cm}(1 - 1,645 \cdot \delta)$$

onde:

f_{ck} = resistência a compressão característica do concreto (megapascals);

f_{cm} = resistência a compressão média do lote das amostragens (megapascals);

δ = coeficiente de variação.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas (2004), para efeito de cálculo das estruturas de concreto armado usuais a resistência característica a compressão do concreto deve ser minorada pelo coeficiente de combinações últimas normais (γ_c), para testes realizados com corpos de prova com idade de 28 dias utiliza-se a fórmula mostra abaixo:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

onde:

f_{cd} = resistência a compressão do concreto para cálculo (megapascals);

γ_c = 1,4 para combinações últimas normais.

Ainda segundo Associação Brasileira de Normas técnicas (2004), a resistência do concreto a tração como citado anteriormente é menor do que a resistência à compressão, os valores para tal resistência podem ser obtido por métodos conforme estabelecem as normas regulamentadoras NBR 7222:1994 e NBR 12142:1991, para efeito de cálculo simples e direto, a NBR 6118:2003 permite o uso da seguinte equação:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

onde:

f_{ctm} =resistência média do concreto a tração (megapascals).

O aço utilizado em estruturas de concreto armado segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2004), é classificado pela sigla CA e pelo valor da resistência de escoamento mínimo expresso em kilonewtons por centímetro quadrado, a NBR 7480:1996 regulamenta o uso de aço para concreto armado das categorias CA-25, CA-50 e CA-60, sendo fornecido em barras podendo ser estas de superfície lisa para CA-25, entalhada para CA-60 ou de alta aderência para CA-50. As dimensões das barras que podem ser empregadas no concreto armado devem ser superiores a 5 milímetros de diâmetro sendo estas de aço produzido por laminação a quente, diâmetros abaixo de 10 milímetros para aço produzido pelo processo de trefilação são considerados fios e não barras.

A resistência do aço, de acordo com Borges (2010), é determinada pelo ensaio de tração. Neste ensaio parâmetros importantes para o dimensionamento de estruturas de concreto armado como: resistência característica do aço a tração, limite de resistência e alongamento até a ruptura, podem ser determinados. Este ensaio tem seus dados expressos em gráfico de tensão-deformação, com base nos dados do gráfico é possível calcular a resistência característica de escoamento do aço (f_{yk}), que é a máxima tensão que determinada área de aço suporta sem sofrer deformações permanentes. Para efeito de cálculo em estruturas usuais de concreto armado tal resistência deve ser minorada pelo coeficiente de ponderação (γ_s), com o valor de 1,15 devido a combinações de ações normais ou especiais, representada desta forma:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$$

onde:

f_{yd} = resistência de cálculo do aço a tração (megapascals).

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2004), o limite de resistência determinado no ensaio apresenta a tensão máxima que tal aço resistiu até sua ruptura, sendo este valor desconsiderado no dimensionamento de estruturas, pois tal carregamento leva a deformações permanentes das armaduras. O alongamento na ruptura é o aumento no comprimento da barra durante o ensaio. A deformação específica do aço (ε_y) pode ser determinada para barras de aço que apresentem patamar de escoamento, conhecida a resistência característica do aço a tração e o seu módulo de elasticidade, tal valor pode ser encontrado utilizando os princípios da Lei de Hooke pela seguinte equação:

$$\varepsilon_y = \frac{f_{yk}}{E_s}$$

onde:

ε_y = deformação específica do aço (porcentagem);

f_{yk} = resistência característica do aço a tração (megapascals);

E_s = módulo de elasticidade do aço (megapascals).

Através da TAB. 1 são apresentados os valores para as propriedades mecânicas das categorias dos aços utilizados em estruturas de concreto armado.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço para concreto armado

Aço	f_{yk} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	ε_{yd} (%)	$\xi \left(\frac{x}{d}\right)$
CA-25	250	217	0,104	0,7709
CA-50	500	435	0,207	0,6283
CA-60	600	522	0,248	0,5900

Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2004)

5.1.6.2 Cobrimento das armaduras

Segundo Campos Botelho e Marchetti (2010), com o intuito de assegurar a durabilidade da estrutura de concreto armado como um todo e principalmente manter o aço protegido de agentes agressores do meio externo as peças, durante o dimensionamento da estrutura deve ser determinado a espessura de uma camada de concreto envolvendo as faces da armação das peças portantes da estrutura, camada esta chamada de cobrimento. O cobrimento é determinado pelo meio em que a estrutura será implantada, levando em consideração o grau de agressividade que tal meio exerce nesta estrutura definidos na TAB. 2 usada para classificar a classe de agressividade a qual esta estrutura será afetada.

Tabela 2 – Classe de agressividade do ambiente

Classe de agressividade	Grau de agressividade	Ambiente da estrutura	Risco de deterioração
1	Fraco	Rural ou submerso	Insignificante
2	Moderado	Urbano	Pequeno
3	Forte	Marinho ou industrial	Grande
4	Muito forte	Industrial quimicamente agressivo ou sujeito a respingos de maré	Elevado

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2004)

De acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas (2004), com a determinação da classe de agressividade do ambiente onde a estrutura será criada deve-se observar a qualidade do concreto que será empregado nesta a fim de se garantir que este tenha desempenho suficiente para manter as peças portantes da edificação protegidas dos agentes agressivos presentes neste ambiente. Como citado anteriormente no item 5.1.4 deste trabalho, o fator água/cimento é um fator que determina a durabilidade, resistência e qualidade do concreto, deste modo a TAB. 3 define os valores máximos do fator água/cimento e a resistência mínima do concreto utilizado em estruturas pertencentes a cada classe de agressividade.

Tabela 3 – Qualidade do concreto a ser utilizado.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		1	2	3	4
Fator água/cimento	Concreto armado	≤ 0.65	0.6	0.55	≤ 0.45
Classe de resistência do concreto em Mpa	Concreto armado	≥ 20	25	30	≥ 40

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2004)

Ainda de acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas (2004), o cobrimento a caráter de execução da estrutura deve ser definido em projeto acrescido de uma tolerância com intuito de assegurar que a camada mínima necessária de cobrimento seja respeitada. Esta tolerância é expressa por Δc , em obras com acompanhamento técnico de execução da estrutura de concreto armado sujeita a um rigoroso controle de qualidade pode-se adotar $\Delta c = 5$ mm, já em obras que não possuem profissionais com capacidade técnica suficiente á garantir a qualidade da execução dos serviços que determinam a espessura final do cobrimento, fica definido os valores com $\Delta c = 10$ mm conforme TAB.4, tais valores de cobrimento acrescidos de Δc são chamados de cobrimento nominal.

Tabela 4 – Cobrimento nominal mínimo

Tipo de estrutura	Elemento portante	Classe de agressividade ambiental			
		1	2	3	4
		Cobrimento nominal mínimo			
Concreto armado	Laje	2 cm	2,5 cm	3,5 cm	4,5 cm
	Viga ou pilar	2,5 cm	3 cm	4 cm	5 cm

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2004)

5.2 Reforço estrutural com sistema Composto de Fibras de Carbono (CFC)

A idéia do uso de fibras de carbono para reforço de estruturas de concreto armado, segundo Souza e Ripper (1998), teve sua concepção no início dos anos 80 no Japão. Devida grande incidência de abalos sísmicos em curto espaço de tempo e com escalas consideráveis, várias construções tinham suas estruturas comprometidas, especialmente os pilares e o período para reparo de tais estruturas era reduzido. Dentro deste contexto, o governo japonês e entidades privadas se uniram na pesquisa de novas tecnologias que suprissem a necessidade de reforçar os pilares das edificações com eficácia, segurança e agilidade. Como o uso de fibra de carbono naquela época já era bem comum nas indústrias do tipo navais e automobilísticas no reforço de várias peças, testes realizados comprovaram sua eficiência em reforços de estruturas de concreto armado. Após o terremoto de Kobe em 1995 esta técnica ganhou mais repercussão e aprimoramento.

O reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono, ainda de acordo com Souza e Ripper (1998), não fica restrito apenas para pilares como no início de seu emprego. As propriedades mecânicas deste composto permitem o seu uso em outras peças portantes das estruturas de concreto armado danificadas como lajes e vigas. As fibras de carbono dispostas corretamente sobre tais peças resistem perfeitamente aos esforços de tração e cisalhamento resultantes do carregamento da estrutura como um todo.

De acordo com Machado (2002), este método de reforço se destaca dos demais pela fácil execução conservando as características arquitetônicas originais da edificação devida à espessura da manta, que gira em torno de 0,166 mm e sua acomodação ao formato das peças a serem reforçadas. Este sistema de reforço não exerce carregamento considerável à estrutura já que todos os seus componentes são leves, com peso total do composto na faixa de 500 g/m², sendo assim o uso deste em pavimentos superiores de edifícios, não acarreta o aumento de esforços no restante da estrutura.

O reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono (CFC) contribuiu com o avanço do melhoramento das estruturas de concreto armado existentes, proporcionando o uso destas sobre maiores carregamentos e a recuperação de peças que tenham a resistência afetada por acidentes que exerceram impacto sobre esta, erros devido a má preparação dos

componentes e irregularidades durante a execução dos serviços de montagem e locação de formas tais como a disposição das armaduras e preenchimento da forma com concreto. Este método de reforço pode ser entendido como a evolução de métodos pioneiros como, o aumento da seção de concreto, confinamento com nova armadura e lançamento de concreto projetado nesta, suportes de perfis metálicos, além de métodos mais recentes como o uso de chapas metálicas aderidas com resina epóxídica. (GALLARDO, 2002).

5.2.1 Componentes do sistema

O sistema composto de fibras de carbono utilizado no reforço de estruturas de concreto armado tem seus componentes divididos em: elemento estrutural e matriz polimérica. Segundo Machado (2011), a atuação destes em conjunto é o que possibilita a perfeita eficácia do sistema para resistir os esforços atuantes na estrutura. Fica a cargo de a matriz polimérica garantir a adesão do elemento estrutural à superfície de concreto e permitir que o conjunto tenha coesão, o que propicia assim a passagem das tensões cisalhantes entre o concreto e as fibras de carbono por adesão e atrito. A matriz polimérica é composta por:

- Imprimador epoxídico: penetra nos poros da peça de concreto a ser reforçada criando uma camada que permita a transmissão dos esforços;
- Pasta de regularização: pasta epoxídica usada a fim de conformar a superfície de concreto para que os esforços sejam transmitidos uniformemente para as fibras de carbono;
- Resina saturante: usada para saturar as fibras de carbono e realizar a aderência destas sobre a superfície da peça de concreto pós-aplicação das camadas citadas acima.

O elemento estrutural utilizado neste sistema são as fibras de carbono, que por possuir elevada resistência mecânica e a ataques químicos, grande rigidez, baixa deformação e não sofrer corrosão apresenta um desempenho excepcional no reforço estrutural. A característica principal das fibras de carbono no que diz respeito à resistência é a alta capacidade de absorver os esforços de tração exercidos pelo carregamento da estrutura. (GALLARDO, 2002).

Segundo Neto e Pardini (2006), a fibra de carbono foi criada em 1880 por Thomas Edison que utilizava os filamentos desta para fabricação de lâmpadas elétricas. Com o passar dos anos e crescente estudo deste material, novas aplicações foram designadas a este devido às características de possuir alto módulo de elasticidade, elevada resistência à tração e por ser um material que se adapta ao contorno da superfície a qual será empregado. A fibra de carbono é obtida por meio do processo de pirólise de materiais orgânicos denominados precursores, tal processo é realizado através da remoção dos átomos de nitrogênio, hidrogênio e oxigênio presentes no precursor utilizado, esta remoção é executada com tratamento térmico sob temperaturas acima de 1000°C. A temperatura do processo de tratamento térmico reflete diretamente nas propriedades mecânicas do produto final, fibras de carbono obtidas com tratamento térmico final na ordem de 1000°C são consideradas de baixo módulo de elasticidade com valor na faixa de 100 GPa e baixa resistência à tração.

Existem vários materiais que podem ser utilizados como precursores para fabricação da fibra de carbono. No entanto, os mais utilizados são as fibras de celulose podendo ser de algodão ou viscose comercializada como *rayon*, poliacrilonitrila conhecida como PAN e os piches de petróleo ou alcatrão de hulha. Dentre estes precursores os mais utilizados são o piches e a PAN devido o seu baixo custo se comparado aos demais e por elevar ainda mais os valores de módulo de elasticidade e resistência à tração com o aumento da temperatura do processo de tratamento térmico. O precursor *rayon* apresenta um produto final de melhor desempenho e qualidade, mas por ser um material de difícil obtenção e de alto custo tornou-se inviável o uso deste na obtenção de filamentos de fibra de carbono. (NETO; PARDINI, 2006).

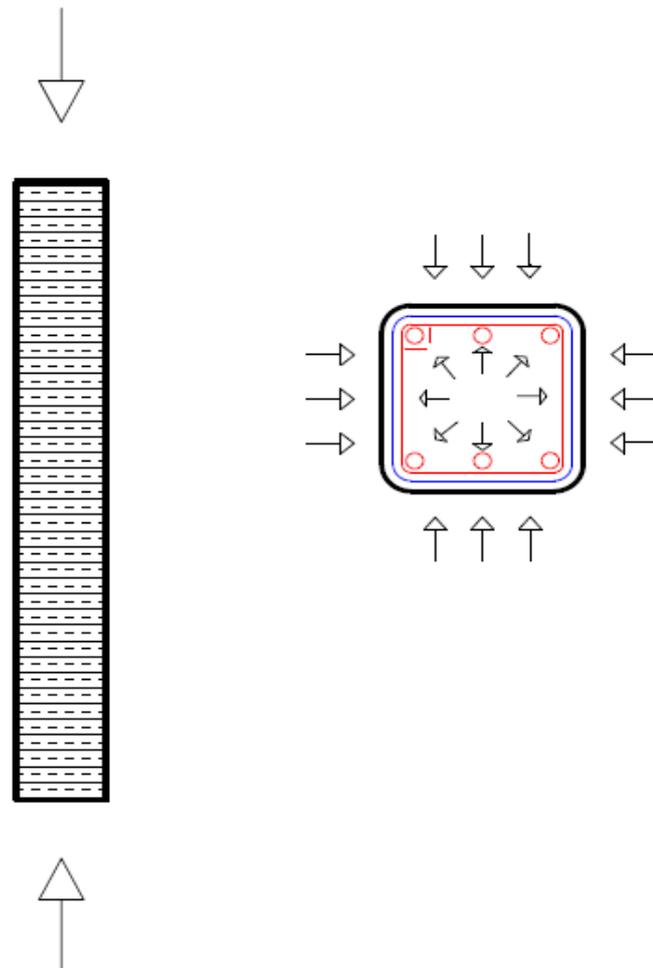
5.2.3 Orientação das fibras segundo função estrutural

Como citado anteriormente, as fibras de carbono possuem elevada resistência a tração, no entanto sua implantação no reforço de estruturas de concreto armado não se restringe a apenas peças que sofram esforços de tração. Segundo Machado (2011), o reforço com fibras de carbono podem ser aplicados em peças que sofram ações de cargas axiais, resultando a esforços de compressão sobre estas, pelo método de confinamento da peça portante de concreto armado e

também na anulação dos efeitos cisalhantes em peças portantes e até mesmo em paredes.

Ainda de acordo com Machado (2011), o reforço a compressão em pilares se define pelo princípio de que o carregamento axial aplicado nestes em valores ao ponto de ruptura do concreto, resulta no esmagamento deste e posterior aumento na área da seção transversal da peça. Este aumento gera esforços transversais ao eixo da peça, que com a elevada resistência das fibras de carbono a tração, alinhadas transversalmente ao eixo do pilar de forma a confinar este, exercem uma pressão contrária aos esforços causados pela deformação do pilar, anulando estes. (FIG. 1).

Figura 1 - Esquema de tensões em pilares reforçados



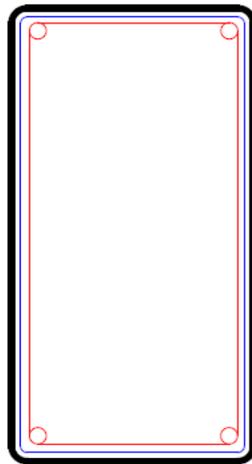
Fonte: O autor 2014

O reforço de vigas de concreto armado com sistema CFC aos esforços cisalhantes deve ser avaliado cautelosamente, pois como se sabe a ruína de peças portantes por cisalhamento acontece de forma repentina. Segundo Beber (2003), o fato de o reforço com sistema composto de fibra de carbono ser realizado externamente, leva a considerar que o desempenho deste está diretamente ligado a qualidade da matriz polimérica, que realiza a adesão do compósito na superfície da viga.

Segundo Machado (2002), assim como nos estribos das vigas de concreto armado, a inclinação das tiras de fibra de carbono posicionadas para combater a força cisalhante, eleva e muito a sua eficácia. A aplicação do reforço com fibra de carbono a cortante pode ser realizada pelos três modos seguintes:

- Envolvimento total da superfície transversal: este modo é o de melhor desempenho, pois além de combater os esforços de cisalhamento causados em partes que sofrem tanto momento positivo como negativo, ainda garante a perfeita ancoragem do sistema como um todo, em vigas onde se tem ligação direta com laje este método tem sua execução um pouco mais complicada por ser necessária a transposição da laje pelas tiras de fibra de carbono. (FIG 2).

Figura 2 - Reforço em toda a seção transversal

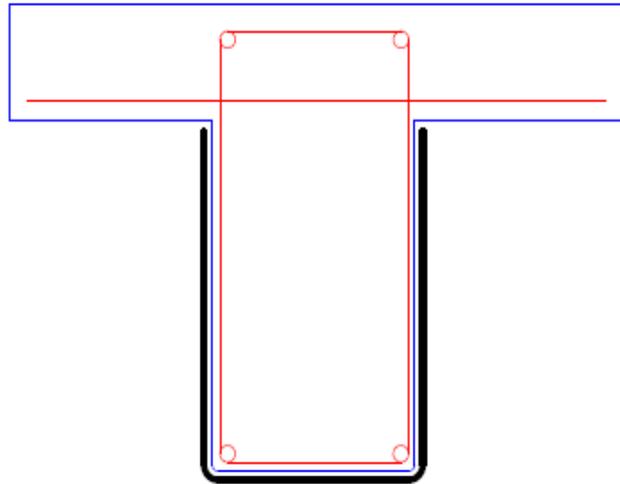


Fonte: O autor (2014)

- Modo de envolvimento tipo U: método mais usado por se adaptar perfeitamente em vigas ligada a lajes apresenta bom desempenho em pontos de momento positivo, mas não acrescenta resistência ao

cisalhamento em seções de momento negativo. Auxilia na ancoragem do sistema de combate a flexão. (FIG 3).

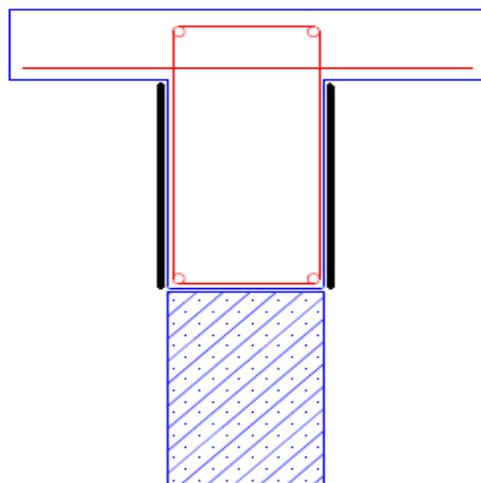
Figura 3 - Reforço tipo U



Fonte: O autor (2014)

- Envolvimento lateral: dentre os outros métodos é menos eficaz sendo utilizado apenas em situações que não será possível modo algum o emprego dos métodos citados anteriormente. Mesmo não apresentando desempenho tão satisfatório como os outros modos, ainda assim acrescenta consideravelmente os valores de resistência a esforços cisalhantes. (FIG 4).

Figura 4 - Reforço lateral



Fonte: O autor (2014)

5.2.4 Conceitos básicos de dimensionamento

A primeira etapa para se efetuar o dimensionamento do reforço estrutural com sistemas compostos de fibra de carbono é a verificação do estado atual da estrutura de concreto armado e análise dos esforços solicitantes nesta. De acordo com Machado (2011), depois de realizada a análise de todos os carregamentos que a estrutura deve resistir em comparação com o que ela realmente resiste em seu estado atual, se torna possível determinar se há a necessidade deste reforço no caso de carregamento em excesso, ou se a estrutura por si só suporta os esforços gerados pelo carregamento obtido. De posse dos valores de esforços excedentes na estrutura, o dimensionamento do reforço pode ser realizado. Devida à falta de normas que regulamentam o dimensionamento de reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibras de carbono no Brasil, este é realizado segundo a FIB (Fédération Internationale du Béton) Bulletin 14 ou pela norma americana ACI (American Concrete Institute) Committee 440 e 318.

De acordo com Souza e Ripper (1998), o sistema deve resistir os esforços de tal maneira que seja considerado a ruptura da matriz polimérica dúctil, já que as fibras de carbono apresentam ruptura frágil. Deste modo a resistência do sistema como um todo só ficara comprometido com a aplicação de tensões que levem a ruptura das fibras, até este ponto crítico a matriz polimérica se deforma, mas continua garantindo a adesão do sistema na superfície da peça portante de concreto armado.

5.2.4.1 Reforço de vigas

O dimensionamento de tal reforço para peças sob ação de flexão, segundo Beber (2003), leva em consideração critérios que garantam a estabilidade estrutural da peça, como coeficientes de minoração do desempenho do reforço por este ser um método no qual a análise da interação entre os seus componentes e o concreto armado ainda ser uma área sob estudo e pesquisa tecnológica e desconsideração da contribuição de resistência do concreto à tração conforme a maioria das normas rege, tais coeficientes acabam por gerar maior número de camadas de fibra de carbono a serem utilizadas aumentando a estabilidade estrutural. Os modos de rupturas considerados no dimensionamento são devido ao escoamento da armadura

longitudinal, levando a rotura da matriz polimérica e as fibras de carbono do reforço ou ao esmagamento do concreto.

De acordo com Gallardo (2002), outro fator de suma importância para o desempenho no que diz respeito a o emprego do reforço à flexão em vigas, é o dimensionamento da largura do sistema e possível necessidade de ancoragem desta. Os esforços de tração que atuam na extremidade de vigas devem ser uniformemente transmitidos para o reforço, sendo assim a determinação da largura do laminado ou manta de fibra de carbono a ser empregado na peça deve ser no mínimo igual a largura da base da viga em questão. Em alguns casos dependendo do estado em que se encontra o substrato de concreto, o reforço que possui os filamentos de fibra de carbono dispostos longitudinalmente ao eixo da viga com intuito de resistir aos esforços de tração, tem a necessidade de ser ancorado em seu sentido transversal com outra camada do sistema CFC. Esta ancoragem pode ser realizada com a mesma camada de reforço ao cisalhamento.

Outro modo de se garantir a ancoragem do sistema de reforço em vigas é o aumento do comprimento do composto matriz polimérica – fibra de carbono até os pontos de apoio da peça. Estas observações devem ser realizadas tanto no dimensionamento como na execução do sistema, pois tais fatores garantem que o reforço não chegue ao colapso precoce devido ao desprendimento da camada de concreto levando a perda da ponte de aderência entre a estrutura e o sistema de reforço. (GALLARDO, 2002).

5.2.4.2 Reforço de pilares

Como citado anteriormente no item 5.2.3, o reforço com sistema CFC pode ser utilizado em peças que sofram carregamento axial causando esforços de compressão, segundo Machado (2011), o dimensionamento deve ser efetuado levando em consideração a resistência já exercida pela pressão de confinamento do concreto gerada pelos estribos de modo a evitar o super dimensionamento das camadas de fibra de carbono. Um ponto importante a ser ressaltado é a influência da geometria do pilar na capacidade de resistência ganha com o reforço, os pilares de seção circular apresentam resistência à compressão entorno de 50% a mais do que pilares de seção retangular. Esta discrepância é fundamentada na distribuição das tensões internas da peça, sendo estas direcionadas radialmente em toda a

seção transversal de peças com seção circular, o que não ocorre em pilares retangulares em consequência da diferença entre a distância das extremidades do pilar até o eixo de aplicação das cargas gerando a distribuição desproporcional das tensões na interface concreto – matriz polimérica.

O reforço deve ser realizado sob a hipótese de mudanças drásticas no carregamento da estrutura, acidentes que danifiquem o pilar, patologias, ocorrência de terremotos, erros de execução que modifiquem as características geométricas e de locação, perda das características de resistência do concreto devida sua execução irregular e o comprometimento da armadura devida a ação corrosiva. O emprego deste sistema tem principal destaque na recuperação e reforço de colunas de viadutos e pontes, por ser um material que na forma de manta adapta-se ao contorno da peça e por tornar esta mais dúctil visto que a matriz polimérica e as fibras de carbono auxiliam a capacidade resistente da peça a partir do ponto em que os carregamentos a esta aplicados superam a resistência da peça sem reforço. (SOUZA; RIPPER, 1998).

5.2.5 Comportamento do CFC em ambientes agressivos

De modo geral o reforço de estruturas de concreto armado com sistema CFC em ambientes sob ação de agentes químicos e em alta temperatura, deve ser verificado o comportamento não apenas da fibra de carbono, mas também da matriz epóxica. De acordo com Machado (2011), as fibras de carbono por ter origem de um material inerte, ou seja, este não sofre nenhuma reação química em contato com outros materiais, preserva suas propriedades mecânicas mesmo em ambiente quimicamente agressivo. A fibra de carbono também apresenta bom desempenho em ambientes sob a ação calor intenso, de modo que seu desempenho em resistir carregamentos longitudinalmente à direção das fibras é mantido até temperaturas que giram no entorno de 1500°C.

De acordo com Costa Firmo (2010), o desempenho do sistema como um todo em ambientes sob ação química por si só é bem satisfatório. No entanto, quando se é analisado o comportamento da matriz epóxica sob alta temperatura, observa-se a necessidade de um estudo mais cauteloso sobre este, pois a resistência à tração da matriz epóxica é afetada após se exceder a temperatura de transição vítrea desta, que fica aproximadamente a 90°C. Esta temperatura é o ponto no qual a

estrutura molecular do material é afetada e seu módulo de elasticidades é consideravelmente reduzido, o que compromete a aderência do sistema na superfície da peça de concreto armado. Para efeito de dimensionamento admite-se que para temperaturas ambiente de até 70°C, o sistema pode ser aplicado sem maiores precauções sobre a capacidade resistente deste.

No que diz respeito ao comportamento do sistema de reforço CFC em situações de incêndio, de acordo com Oliveira (2012), a matriz polimérica do sistema além de apresentar perda de aderência sobre a ação de alta temperatura, as resinas utilizadas na matriz são combustíveis o que pode levar a propagação das chamas e o aumento de fumaça. Algumas técnicas são utilizadas para minimizar a ação do fogo sobre a matriz polimérica do sistema de reforço da estrutura de concreto armado. Estas técnicas são geralmente confundidas com a implantação de sistemas para melhora do conforto térmico do ambiente que são totalmente distintas do que se usa para aumentar a resistência ao fogo. As proteções mais utilizadas para aumento da resistência ao fogo das peças portantes reforçadas são:

- Argamassa cimentícia: compostos a base de gesso e cimento portland, com adição de poliestireno expandido. Quando exposta a alta temperatura o gesso gera o aumento de volume e juntamente com os demais componentes absorvem o calor gerado pelas chamas durante um período de tempo em média de 30 minutos;
- Isolamento com alvenaria: técnica pioneira na proteção de estruturas contra incêndios, utilizada em pilares reforçados, envolvendo-os com alvenaria de tijolos;
- Argamassa vermiculita: tem como componente base a vermiculita, que com aumento da temperatura se expande formando câmaras de ar no interior do revestimento o que isola a ação do fogo na matriz polimérica do sistema de reforço com CFC;
- Pintura intumescente: a tinta empregada reage com o aumento da temperatura gerando grande aumento de volume desta, o que inibe a transferência de energia térmica do meio para a peça protegida. Esta tinta mantém sua forma inicial como qualquer outra e deve receber outra camada de tinta acrílica para efeitos estéticos e proteção desta contra agentes químicos;

- Placas: as placas mais utilizadas para isolamento térmico do sistema são compostas por gesso com adição de vermiculita e fibra de vidro, porém o seu uso se restringe à ambientes internos. Existem placas compostas por outros materiais como a lã de rocha e silicatos, a proteção por placas apresenta bom acabamento.

Além da utilização de dispositivos de proteção contra a ação do fogo, durante o processo de cálculo e dimensionamento é comum o uso de alguns artifícios para contornar os efeitos de um incêndio na estrutura como um todo. Admite-se a desconsideração da resistência ao fogo do sistema de reforço analisando apenas o desempenho da estrutura de concreto armado nas condições empregadas pelo incêndio, visto que o reforço fica responsável por resistir os esforços de acréscimo de carregamento, apenas em condições normais de uso da estrutura. Neste caso a matriz polimérica a ser utilizada é composta a base de resina epóxica termoplástica que ao ser aquecida volta a sua forma natural de produto viscoso e com o resfriamento da estrutura se solidifica novamente. (COSTA FIRMO, 2010).

5.2.6 Procedimentos de execução do reforço de CFC na peça de concreto armado

De acordo com Gallardo (2002), o processo de aplicação do reforço requer grande atenção por ser um composto em que o desempenho de seus materiais está diretamente ligado ao contexto no qual estes são aplicados. Fatores como a temperatura e umidade da superfície da peça de concreto armado, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e a qualidade em que se encontra o concreto da superfície da peça influenciam diretamente na interação entre concreto e matriz polimérica. Como citado anteriormente a aderência entre a peça portante de concreto armado e o reforço com sistema CFC, fica responsável pela transferência dos esforços solicitantes da peça portante para o elemento estrutural do reforço. Deste modo a garantia de eficácia do sistema esta ligada aos métodos construtivos deste, que são definidos pelo fabricante dos componentes do sistema, as principais etapas serão tratadas a seguir.

5.2.6.1 Controle e recuperação do concreto

A primeira etapa do processo construtivo do reforço de estruturas de concreto armado com o sistema CFC deverá ser a verificação do estado do concreto da camada de cobrimento da peça a ser reforçada. A presença de irregularidades, cavidades e fissuras nesta superfície devem ser reparadas, pois estas dificultam a aderência do sistema no concreto. Além disto, nesta etapa a qualidade deste concreto deve ser avaliada e no caso de degradação da camada de cobrimento e possível corrosão da armadura, medidas como a remoção do substrato de cobrimento, limpeza e posterior passivação da armadura e a recomposição da camada de cobrimento desta, são necessárias para recuperação e controle dos danos causados por tais patologias e para garantir que tal superfície tenha resistência adequada para realizar a transição dos esforços entre a peça e o sistema de reforço. (OLIVEIRA, 2012).

5.2.6.2 Preparo da peça portante a ser reforçada

Após a recuperação do concreto da superfície da peça, de acordo com Beber (2003), inicia-se a preparação desta para aplicação do reforço. O primeiro passo nesta etapa é o desbaste da camada superficial de concreto com intuito de retirar a pasta que era afetada diretamente com os efeitos dos agentes agressivos do ambiente da estrutura, tal serviço pode ser realizado com o uso de lixadeiras, jato de areia ou jato d'água de modo a eliminar apenas uma fina camada do substrato sem causar irregularidade à superfície. A aplicação deste sistema de reforço com camadas sobrepostas em mais de uma face da peça posicionadas sobre arestas desta, leva a concentração de tensões neste ponto e provável ocorrência de vazios que afeta a aderência entre o concreto e a matriz polimérica, deste modo tais arestas devem ser arredondadas para minimizar os efeitos de tensões pontuais. Posteriormente a superfície em que o reforço será aplicado deve ser limpa e seca eliminando a presença de poeira, graxa, umidade e qualquer tipo de material que possa prejudicar a penetração e aderência das resinas na superfície de concreto.

5.2.6.3 Tratamento da superfície de contato

Com o intuito de melhorar a adesão do sistema na estrutura a superfície recebe o tratamento com produtos que auxiliam na transferência dos esforços entre os elementos estruturais da peça portante existente e o reforço. Inicialmente deve ser aplicado o *primer* chamado de imprimador primário, que tem a função de vedar os poros do concreto pela penetração e fixação nestes, melhorando capacidade de aderência do sistema, no caso de concretos de alto desempenho que apresentem boa compacidade o uso do imprimador pode ser descartado. Em peças que apresentem falhas na sua superfície, chamadas tradicionalmente de brocas, ocasionadas pela má execução dos serviços de concretagem ou buracos causados por impactos de objetos sofridos por esta, emprega-se a aplicação de massas regularizadoras para calafetar tais falhas com a função de conformar a superfície de contatos da estrutura. (MACHADO, 2011).

5.2.6.4 Manuseio e saturação do elemento estrutural fibra de carbono

Segundo Azevedo (2008), o processo de manuseio das mantas ou laminados de fibra de carbono requer cuidados para se garantir que o desempenho final desta será o mesmo definido no dimensionamento, analisando o material no ato do recebimento com atenção em danos que possam ter ocorrido durante o transporte deste. No caso do material apresentar qualquer dano o uso deste deve ser descartado. Outro fator de importância é a qualidade do corte da manta, pois como citado anteriormente no item 5.2.3, a orientação dos filamentos de fibra de carbono é o que define a capacidade e o tipo de carregamento a ser resistido, deste modo cortes realizado em sentido contrário ou fora filamento longitudinal afetam a eficácia do sistema.

Realizado o corte da manta esta passa pelo processo de saturação com resina a base de epóxi que constitui a matriz polimérica do composto. A saturação pode ser realizada de dois modos, em uma banca na qual se estende a manta que recebe resina de saturação e logo em seguida é feita a aplicação da manta saturada na peça de concreto, ou a saturação realizada diretamente na peça que é impregnada com a resina saturante e imediatamente recebe a manta, pois o tempo de pega da resina gira em torno de apenas 30 minutos. Existe a opção de aplicação

deste elemento estrutural pré-fabricado comercialmente vendido como laminado de fibra de carbono, nesta forma o material é fornecido nas dimensões necessárias para sua aplicação e com o processo de saturação já realizado, deste modo a lamina apenas é colada na peça com adesivo epóxico. (AZEVEDO, 2008).

5.2.6.5 Camada final de saturação

De acordo com Costa Firmo (2010), o processo de aplicação da manta devidamente saturada na peça de concreto é feita com o auxílio de rolo metálico com ranhuras no sentido longitudinal que pressionado sobre o composto elimina os vazios entre a superfície de contato dos elementos, maximizando a adesão do sistema e proporcionando a transferência de esforços entre os elementos. Em algumas situações os esforços a serem resistidos requerem a aplicação de demais camadas do composto de fibra de carbono, assim a camada anteriormente aplicada deve ser novamente saturada para aplicação da camada seguinte, depois de fixada a última camada do sistema de reforço faz-se novamente a saturação desta com a função de fixação desta camada e fechamento da matriz polimérica do sistema como um todo. Quando utilizado o sistema de laminado de fibra de carbono em mais de uma camada, o processo de colagem será o mesmo utilizado na superfície da peça de concreto, visto que a última camada deste sistema não se faz necessária a aplicação de nenhum material, pois a matriz polimérica deste já estará totalmente fixada e fechada. Em algumas situações após esta etapa o sistema pode ser revestido com intuito estético e ou para proteção contra a ação do fogo.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será apresentada a metodologia utilizada para desenvolvimento deste trabalho, indicando os ensaios e materiais utilizados para a constituição deste. Os ensaios efetuados neste trabalho têm a função de apresentar um comparativo entre a resistência de uma determinada amostra de concreto com e sem o reforço do sistema CFC, sob influência de carregamento axial. Foram realizados os seguintes ensaios:

- Abatimento pelo tronco de cone (*slump test*);
- Resistência à compressão.

6.1 Materiais utilizados

Para fabricação das amostras de concreto e do reforço destas que foram utilizadas no ensaio de compressão, fez-se o uso dos materiais a seguir:

- 0,019 m³ de areia grossa. (FIG. 4);

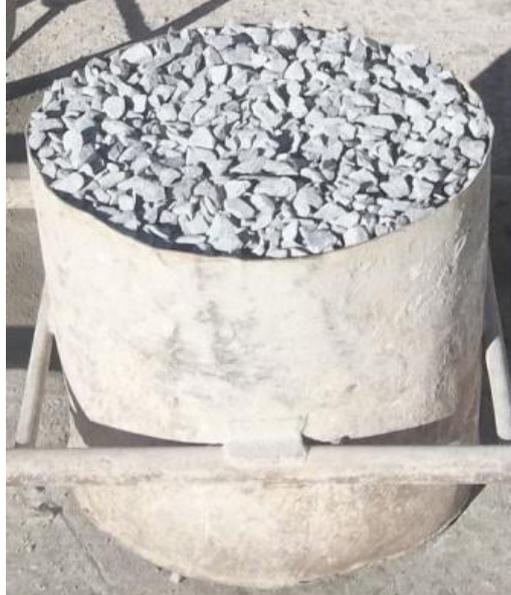
Figura 5 - Areia utilizada



Fonte: O autor (2014)

- 0,038 m³ de brita 1. (FIG. 5);

Figura 6 - Brita utilizada



Fonte: O autor (2014)

- 12,5 Kg de cimento Portland CP-II E 32, produzido pela Lafarge comercializado com a marca Campeão. (FIG 7);

Figura 7 – Cimento utilizado



Fonte: O autor (2014).

- 8 L de água. (FIG 8);

Figura 8 – Água utilizada



Fonte: O autor (2014)

- 0,75 m² de manta de fibra de carbono conforme a FIG.9, a TAB.5 apresenta as características técnicas deste material:

Figura 9 – Manta de fibra de carbono utilizada.



Fonte: O autor (2014).

Tabela 5 – Características técnicas da manta de fibra de carbono.

PRODUTO	Viapol Carbon CFW300	
CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
Peso	300	g/m ²
Espessura	0,166	mm
Resistência máxima de tração	4900	MPa
Módulo de elasticidade	230	GPa
Alongamento de ruptura	2,1	%

Fonte: Machado (2011)

- 500 g de resina saturante FIG. 10, observa-se na TAB.6 as características técnicas do produto utilizado:

Figura 10 – Resina saturante utilizada.



Fonte: O autor (2014).

Tabela 6 – Características técnicas da resina saturante.

PRODUTO:	Viapol Carbon Saturante	
CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
Tempo de uso pós mistura	40	Minutos
Tempo de secagem ao toque	≤ 11	Horas
Cura	7	Dias
Relação de mistura A:B	02:01	Volume
Viscosidade	5000	Cps
Resistência à tração	29	Mpa
Resistência à compressão	68	Mpa
Módulo de compressão	1470	Mpa
Resistência ao cisalhamento	9,8	Mpa

Fonte: Machado (2011).

- 200 g de massa regularizadora FIG. 11, com as características técnicas mostradas na TAB.7 abaixo:

Figura 11 – Massa regularizadora utilizada.



Fonte: O autor (2014).

Tabela 7 – Características técnicas da massa regularizadora.

PRODUTO:	Viapol Carbon Stuc	
CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
Densidade	1,45	g/cm ²
Resistência à aderência	2	MPA
Tempo de secagem ao toque	2	Horas
Tempo de uso pós mistura	40 a 50	Minutos

Fonte: Machado (2011).

- 400 g de imprimador FIG. 12, na TAB.8 são expressas as características técnicas do produto:

Figura 12 – Imprimador utilizado.



Fonte: O autor (2014).

Tabela 8 – Características técnicas do imprimador.

PRODUTO:	Viapol Carbon Primer	
CARACTERISTICAS	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
Cura	7	Dias
Secagem ao toque	8 a 12	Horas
Resistência à aderência	2	MPA
Temperatura ambiente para aplicação	10 a 30	°C
Tempo de uso pós mistura	20 a 50	Minutos

Fonte: Machado (2011)

Os materiais que constituem o sistema CFC para reforço foram fornecidos pelo escritório de engenharia GR BRASIL da cidade de Belo Horizonte – MG juntamente com a fabricante dos componentes VIAPOL.

6.2 Métodos de fabricação dos corpos de prova, reforço e ensaios utilizados

Para apresentação do ganho de resistência à compressão obtida com o emprego do reforço com sistema composto de fibras de carbono, foram realizados ensaios de carregamento axial em diferentes corpos de prova de concreto não armado, sendo estes divididos nos seguintes 3 grupos:

- 4 corpos de prova sem reforço com o sistema CFC;
- 4 corpos de prova reforçados com 1 camada do sistema CFC;
- 4 corpos de prova reforçados com 2 camadas do sistema CFC.

6.2.1 Procedimentos de fabricação, moldagem e cura dos corpos de prova

O concreto utilizado nos corpos de prova ensaiados teve como traço experimental adotado 1:2:4 medidos em padiolas de 0,038 m³, com consumo de 32 litros de água, o que leva a um fator água/cimento de 0,6 com este medidas a resistência característica à compressão esperada é de 20 MPa. Os corpos de prova foram fabricados no dia 02/09/2014, os agregados e demais componentes do concreto foram misturados mecanicamente em betoneira com tambor de capacidade para 400 litros conforme mostra a FIG. 13, como o volume de concreto necessário para fabricação das amostras era pequeno, foi utilizado medidas referentes à ¼ do traço descrito acima. Com o intuito de maximizar a homogeneização do concreto, primeiramente foram dispostos no tambor da betoneira o agregado brita e a metade do volume total de água, logo após foi adicionado o aglomerante cimento CP II – E – 32, e instantes depois o agregado areia foi acrescentado, os componentes lançados na betoneira nesta sequência evitam o empolamento do composto como um todo, o que leva a perda de qualidade da mistura.

Figura 13 – Betoneira utilizada.



Fonte: O autor (2014).

Após o término do processo de fabricação do composto concreto, foi realizado o ensaio de abatimento pelo tronco de cone conforme regulamenta a Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua NBR NM 67:1998. Os equipamentos utilizados no ensaio como mostra a FIG. 14 foram: tronco de cone de 30 cm de altura, diâmetro da base de 20 cm e diâmetro de topo de 10 cm; superfície lisa e plana, haste de aço com seção circular de 16 mm e comprimento de 60 cm e colher de pedreiro. O ensaio se procedeu do seguinte modo: o concreto foi adicionado em 3 camadas de 10 cm de espessura com o auxílio da colher de pedreiro e cada camada foi compactada com 25 golpes da haste de aço, após preenchido o tronco de cone fez-se a retirada deste em 8 segundos e por fim foi medido a diferença de altura entre o tronco de cone e o montante de concreto.

Figura 14 – Equipamentos utilizados no teste de abatimento.



Fonte: O autor (2014).

Posteriormente os moldes cilíndricos dos corpos de prova com dimensão de 10x20 cm foram revestidos com óleo mineral a fim de facilitar a retirada deste. Em seguida o concreto foi adicionado em duas camadas iguais e cada uma desta foi submetida a 12 golpes com a mesma haste de aço utilizada no ensaio de abatimento, conforme regulamenta a Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua NBR 5738:2008. A FIG. 15 mostra parte dos corpos de prova ainda nos moldes. Passadas 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram retirados dos moldes e colocados em recipientes de água livre de impurezas onde permaneceram submersos para cura durante 28 dias.

Figura 15 – Moldes preenchidos com o concreto.



Fonte: O autor (2014)

6.2.2 Execução do reforço com o sistema CFC e ensaios adotados

Completado o período de 28 dias para cura dos corpos de prova de concreto, estes foram retirados do recipiente com água e foram secos para ser iniciada a preparação destes para receber o reforço do sistema CFC. Os corpos de prova destinados a receberem o reforço, foram submetidos a um processo de extração da pasta de concreto da superfície deste realizado manualmente com uma escova de aço como pode ser visto na FIG. 16, a fim de melhorar a qualidade do substrato de concreto que ficará em contato com a matriz epóxídica do sistema, criando uma face rugosa e sem a presença impurezas.

Figura 16 – Preparação do substrato de concreto



Fonte: O autor (2014).

Após os corpos de prova terem sido preparados, prosseguiu-se a execução do reforço com a aplicação do imprimador, que tem como função principal estancar os poros do concreto. O imprimador assim como os demais componentes da matriz epóxídica utilizada, são produtos bi-componentes e suas misturas foram realizadas mecanicamente para garantir a homogeneidade destes, conforme indica o fabricante. Em seguida o imprimador foi aplicado nos corpos de prova, como mostrado na FIG. 17 abaixo.

Figura 17 – Corpos de prova imprimados



Fonte: O autor (2014)

Devida a escolha do traço de concreto com grande volume de agregados graúdo, pouco consumo de água e pelo adensamento do concreto ter sido realizado manualmente, alguns corpos de prova apresentaram irregularidades na sua superfície. Deste modo foi utilizada a aplicação de massa regularizadora própria para aplicação conjunta a este método de reforço, com função de garantir a uniforme transferência de cargas entre o substrato de concreto e o sistema de reforço CFC. Na FIG. 18 pode-se observar a aplicação da massa regularizadora.

Figura 18 – Aplicação da massa regularizadora



Fonte: O autor (2014)

Com fim dos processos de imprimação e regularização, e respeitado o período de secagem dos produtos aplicados que girou entorno de 4 horas, foi iniciada a etapa corte e saturação das fibras. A manta de fibra de carbono foi cortada em 12 partes com dimensão de 34x20 cm, para realização do reforço com 1 camada em 4 corpos de prova e de 2 camadas em outros 4. A saturação foi realizada com impregnação do substrato de concreto com a resina saturante e posterior posicionamento da manta de fibra de carbono conforme o método citado anteriormente no item 5.2.6.4 deste trabalho, a FIG. 19 e 20 mostram respectivamente a impregnação e posterior adesão da manta de fibra de carbono.

Figura 19 – Impregnação com resina saturante



Fonte: O autor (2014)

Figura 20 – Adesão da manta de fibra de carbono



Fonte: O autor (2014)

Os corpos de prova que foram reforçados com apenas 1 camada de fibra de carbono seguiram para a última etapa do processo de execução do reforço, a aplicação de outra demão de resina saturante, que tem como função a proteção da manta de fibra de carbono e o fechamento da matriz polimérica epóxica, garantindo a perfeita aderência do sistema no substrato de concreto. Já os demais corpos de prova que receberam a segunda camada de fibra de carbono, passaram pela aplicação desta outra demão de resina saturante com o intuito de aderir a camada de fibra de carbono final no corpo de prova, e posteriormente receberam uma terceira demão de resina para fechamento da matriz polimérica epóxica,

finalizando a execução do reforço nos corpos de prova. Conforme a indicação do fabricante foi respeitado o intervalo de 40 minutos entre a aplicação de cada demão da resina saturante. A FIG. 21 mostra como ficou um dos corpos de prova reforçados após 12 horas de secagem da última camada de resina saturante aplicada.

Figura 21 – Corpo de prova reforçado



Fonte: O autor (2014)

As ferramentas e equipamentos utilizados na execução do reforço com sistema CFC nos corpos de prova que podem ser vistas na FIG. 22 foram as seguintes:

- Escova de aço: utilizada para retirada da pasta de concreto do substrato de concreto e criar uma superfície rugosa e livre de impurezas;
- Misturador elétrico: usado na homogeneização dos componentes da matriz polimérica;
- Trincha: foi utilizada na aplicação do imprimador e da resina saturante;
- Espátula: seu usada na etapa de aplicação da massa regularizadora;

- Rolo de plástico: teve como função conformar a manta de fibra de carbono na superfície dos corpos de prova.

Figura 22 – ferramentas e equipamentos utilizados



Fonte: O autor (2014)

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no laboratório da empresa Britamil pertencente ao grupo Pavidez Engenharia Ltda. localizada às margens da BR – 354 na cidade de Arcos – MG, os corpos de prova foram ensaiados com o auxílio e supervisão técnica do laboratorista responsável da empresa. O equipamento utilizado no ensaio foi a prensa hidráulica da marca Contenco conforme mostra a FIG. 23, com capacidade máxima de pressão exercida de 120000 Kgf. Como os valores de resistência à compressão do concreto são expressos em MPa, os valores obtidos nos ensaios foram convertidos pela fórmula abaixo conforme estabelece a Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua NBR 5739:1994 citada no item 5.1.6.1 deste trabalho.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2}$$

Figura 23 – Prensa hidráulica



Fonte: O autor (2014)

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio adotado para comprovar a qualidade do concreto utilizado no teste de carregamento axial foi o abatimento do tronco de cone, que como citado anteriormente é uma importante ferramenta para verificação quanto à trabalhabilidade em relação ao consumo de água para tal traço de concreto. O teste realizado como pode ser visto na FIG. 24 teve o valor de abatimento de 50 mm.

Figura 24 – Ensaio de abatimento



Fonte: O autor (2014)

O teste comparativo da resistência à compressão dos corpos de prova foi realizado no dia 09/10/2014. Os primeiros ensaios foram realizados com os corpos de prova sem o reforço do sistema CFC, a TAB. 9 expressa os resultados destes ensaios.

Tabela 9 – Ensaio dos corpos de prova sem reforço com CFC

ENSAIO DE COMPRESSÃO		
CORPOS DE PROVA SEM REFORÇO COM CFC		
ENSAIO	CARGA (Kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP 1	21000,00	26,75
CP 2	19000,00	24,20
CP 3	16000,00	20,38
CP 4	19500,00	24,84

Fonte: O autor (2014)

A FIG.25 mostra o ensaio realizado no corpo de prova 3 e torna possível observa-se a forma de rompimento deste que faz parte do primeiro grupo de amostras do teste comparativo.

Figura 25 – CP 3 Rompido



Fonte: O autor (2014)

A leitura do carregamento resistido até o ponto de ruptura do corpo de prova 3 pode ser confirmada através da FIG. 26 apresentada.

Figura 26 – Leitura de carregamento do CP 3



Fonte: O autor (2014)

Em seguida o teste prosseguiu com o ensaio da segunda parte dos corpos de prova, estes reforçados com uma camada do sistema CFC, a TAB. 10 expressa os resultados obtidos.

Tabela 10 – Ensaio dos corpos de prova reforçados com uma camada de CFC

ENSAIO DE COMPRESSÃO		
CORPOS DE PROVA COM UMA CAMADA DE CFC		
ENSAIO	CARGA (Kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP 5	32000,00	40,76
CP 6	37000,00	47,13
CP 7	32000,00	40,76
CP 8	40000,00	50,96

Fonte: O autor (2014)

A seguir a FIG. 27 mostra a forma de rompimento de um dos corpos de prova reforçados com uma camada do sistema composto de fibras de carbono.

Figura 27 - CP 8 Rompido



Fonte: O autor (2014)

A leitura mostrada na FIG. 28 refere-se ao ensaio do corpo de prova 8 pertencente ao segundo grupo do teste comparativo.

Figura 28 – Leitura de carregamento do CP 8



Fonte: O autor (2014)

Por fim foi realizado o ensaio de compressão por carregamento axial no ultimo grupo de corpos de prova, estes reforçados com duas camadas do sistema CFC, a TAB. 11 expõem os resultados obtidos.

Tabela 11 – Ensaio dos corpos de prova reforçados com duas camadas de CFC

ENSAIO DE COMPRESSÃO		
CORPOS DE PROVA COM DUAS CAMADAS DE CFC		
ENSAIO	CARGA (Kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP 9	58000,00	73,89
CP 10	55000,00	70,06
CP 11	63000,00	80,25
CP 12	57000,00	72,61

Fonte: O autor (2014)

O rompimento do corpo de prova 11 mostrado na FIG. 29 foi o penúltimo ensaio realizado no teste comparativo e refere-se ao grupo reforçado com duas camadas do sistema de reforço.

Figura 29 – CP 11 Rompido



Fonte: O autor (2014)

A FIG. 30 mostra a leitura de carregamento do ensaio do corpo de prova 11, o qual resistiu o maior carregamento de todo o teste comparativo realizado neste trabalho.

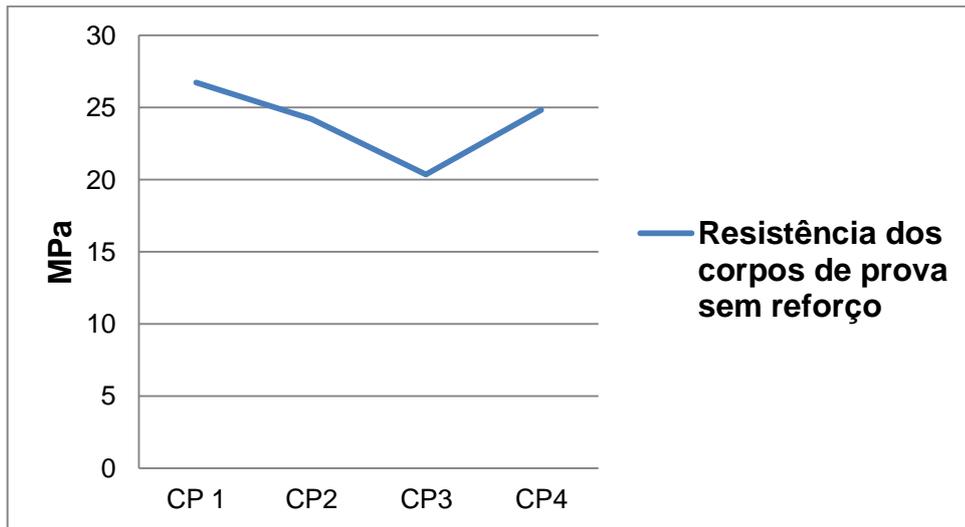
Figura 30 – Leitura de carregamento do CP 11



Fonte: O autor (2014)

Com base nos dados obtidos nos ensaios dos corpos de prova sem o reforço do sistema CFC, a resistência média das amostras é de 24,04 MPa como pode ser observado no GRAF. 1 que representa a variação de resistência existente neste grupo de corpos de prova.

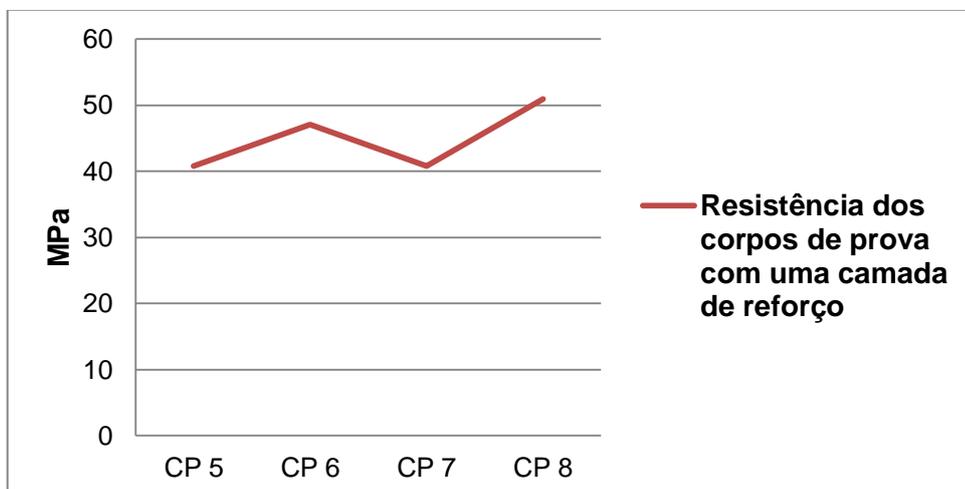
Gráfico 1 – Variação de resistência do grupo não reforçado



Fonte: O autor (2014)

O grupo de amostras reforçadas com uma camada do sistema CFC obteve resistência média de 44,90 MPa, o GRAF. 2 ilustra a variação presente neste no grupo em questão.

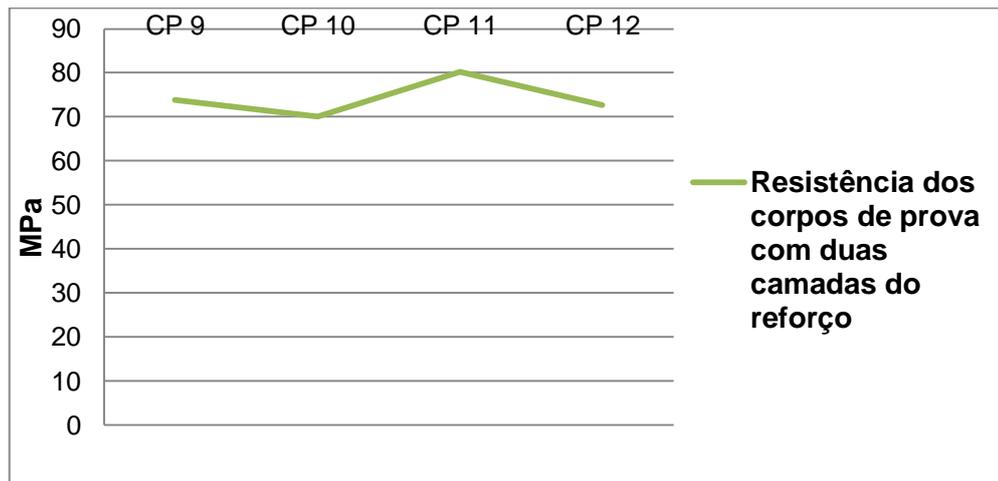
Gráfico 2 - Variação de resistência do grupo reforçado com uma camada do sistema CFC



Fonte: O autor (2014)

Os valores obtidos nos ensaios do ultimo grupo definem a resistência média deste com o valor de 74,20 MPa, a variação da resistência existente nas amostra deste grupo esta representada no GRAF. 3 presente abaixo.

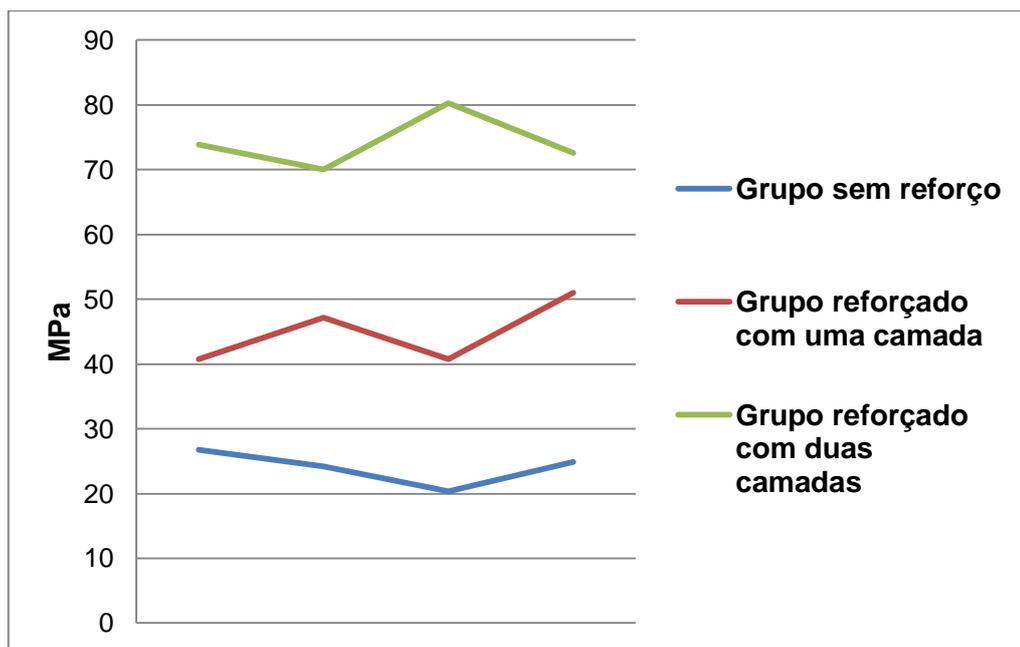
Gráfico 3 – Variação de resistência do grupo reforçado com duas camadas do sistema CFC



Fonte: O autor (2014)

Comparando a variação da resistência entre os grupos ensaiados percebe-se o grande aumento de resistência ganho com o reforço do sistema CFC. (GRAF. 4).

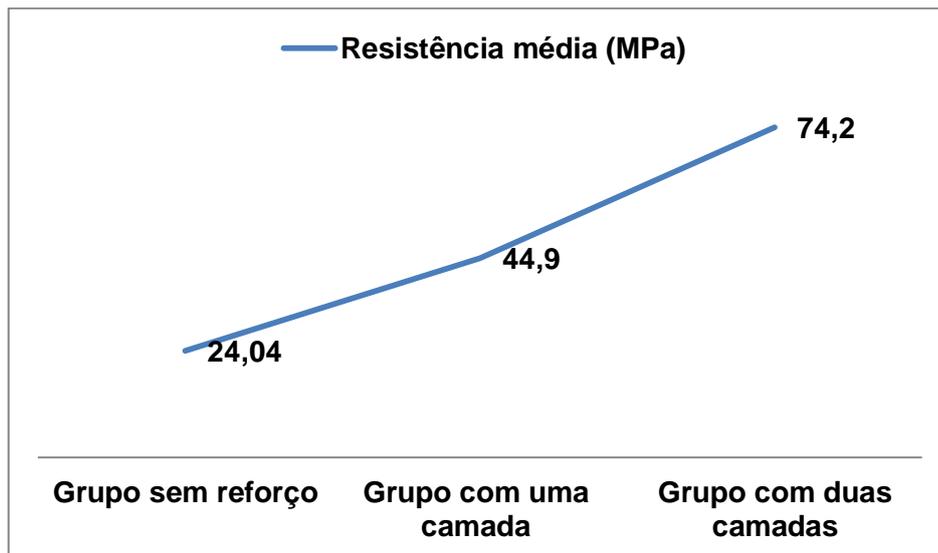
Gráfico 4 – Comparativo de variação da resistência



Fonte: O autor (2014)

A resistência média dos grupos ensaiados também apresentou grande variação no sentido de aumento com a presença do reforço proporcionado pelo sistema CFC, o GRAF. 5 representa a variação da resistência média entre os grupos e torna claro o ganho de resistência conseguido com tal sistema de reforço.

Gráfico 5 – Variação da resistência média



Fonte: O autor (2014)

8 CONCLUSÃO

Com base nas referencias bibliográficas acerca do tema deste trabalho, chega-se a conclusão de que com as normas internacionais, pesquisas e estudos existentes, o reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibras de carbono possui métodos de calculo que permitem o dimensionamento deste. As estruturas existentes reforçadas com este sistema, os testes e ensaios realizados confirmam as seguintes vantagens obtidas com o emprego deste:

- Aumento da vida útil da estrutura;
- Não eleva o carregamento devido o seu baixo peso;
- Conserva as características arquitetônicas da obra por ser um composto de baixa espessura e que pode ser revestido;
- Não sofre os danos causados pela corrosão e por outras patologias características de estruturas de concreto armado;
- Eleva a resistência à tração;
- Por meio do confinamento aumenta a resistência compressão de pilares e colunas.

Durante as pesquisas realizadas foi constatada a falta de normas regulamentadoras para o dimensionamento e execução do referido sistema de reforço em âmbito nacional, fazendo com que a adoção deste método pelos profissionais da área possa ser vista com certo receio. Deste modo, o crescimento do emprego de tal técnica de reforço de estruturas de concreto armado, depende diretamente do empenho em pesquisas e testes, como também a criação de normas regulamentadoras que norteie os engenheiros civis do país no seu dimensionamento e execução.

A respeito do teste comparativo realizado neste trabalho, conclui-se que, o uso do sistema composto de fibras de carbono na recuperação e reforço de pilares e colunas de concreto aumenta consideravelmente a resistência à compressão destes elementos estruturais. Analisando o seu método de execução percebe-se a agilidade e praticidade em realizá-lo, sendo necessárias apenas ferramentas simples e de fácil obtenção.

Enfim com base nas pesquisas e ensaios realizados, chega-se a conclusão de que, o método de reforço de estruturas de concreto armado com o sistema composto de fibras de carbono tem sua eficácia comprovada em relação ao ganho

de resistência à tração e compressão, na facilidade de sua execução e na conservação da harmonia arquitetônica da obra obtidos com seu emprego, tendo como único entrave para sua disseminação no país a falta de investimento no desenvolvimento de pesquisas na criação de normas regulamentadoras para o seu dimensionamento e execução.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

_____. **NBR 5739**: Concreto- Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

_____. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 1984. 7p.

_____. **NBR 12655**: Preparo, Controle e Recebimento. Rio de Janeiro, 1996. 7p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2004. 207p.

AZEVEDO, D. M. M. **Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP**: Recomendações para dimensionamento. 2008. 238 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia civil) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2008.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. 206p. Tese (Doutorado em Engenharia civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BORGES, N. A. **Curso prático de cálculo em concreto armado**: projetos de edifícios. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2010. 252p.

CAMPOS BOTELHO, M. H.; MARCHETTI, O. **Concreto armado eu te amo**. 6.ed. São Paulo: Blucher, 2010. 507p, v.1.

CARVALHO, R.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2003. 2.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2004. 374p.

COSTA FIRMO, J. P. L. **Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibra de carbono (CFRP)**:

Desenvolvimento de sistemas de protecção ao fogo. 262p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

DE SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

FALCÃO BAUER, A. **Materiais de Construção**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 488p.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural** : tópicos aplicados . São Paulo: Pini, 2008. 179p.

GALLARDO, S. M. A. G. **Reforço à Flexão em Vigas de Concreto Utilizando Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono**. 2002. 229 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2002.

LEONHARDT, F.; MÖNNING, E. **Construções de Concreto**: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 336p.

MACHADO, A. P. **Reforço de Estrutura de Construção Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: Pini, 2002. 271 p.

_____. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. Better, 2011. 215 p.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 313p.

OLIVEIRA, C. R. **Sistema de Proteção Para Concreto Reforçado com CFRP em Situação de Incêndio.** 2012. 313 p. Tese (Doutorado em Engenharia civil) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2012.

RIBEIRO, C. C.; SILVA PINTO, J. D.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil.**3.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 112p.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto Leve Estrutural.** São Paulo: Pini, 2009. 144p.

ANEXO A – Exemplo de obras no Brasil reforçadas com o sistema composto de fibras de carbono

São Paulo – SP: Metrô linha 15 Prata (reforço de vigas)



Fonte <http://reforcodeestruturas.com.br/fibradecarbono/engenharia/obras>

Bauru – SP: Shopping Center (reforço contra efeito de punção em laje)



Fonte: <http://reforcodeestruturas.com.br/fibradecarbono/engenharia/obras>

São José dos Campos – SP: ETE (reforço de tanques de tratamento)



Fonte: <http://reforcocodeestruturas.com.br/fibradecarbono/engenharia/obras>

Santana de Parnaíba – SP: Residência (reforço de laje e viga para aumento de carga)



Fonte: <http://reforcodeestruturas.com.br/fibradecarbono/engenharia/obras>

Curitiba – PR: Shopping Center (reforço de lajes para aumento carga)



Fonte: <http://techniques.com.br/reforco-estrutural-com-fibra-de-carbono-em-obras-residenciais>

Curitiba – PR: Edifício residencial (reforço de vigas e pilares para aumento de carga)



Fonte: <http://techniques.com.br/reforço-estrutural-com-fibra-de-carbono-obras-residenciais>